

第 77 回 博士學位論文

指導教授 李 彦 求

신축공동주택 실내공기오염물질의
발생원인 및 방출특성에 관한 실험 연구
- 폼알데하이드와 TVOC를 대상으로 -

An Experimental Study on the Major Causes and
Emission Characteristics of Indoor Air Pollutants
in Newly-Constructed Multi-Family Houses
- with emphasis on HCHO and TVOC -

中央大學校 大學院

建築學科 建築計劃 및 環境專攻

柳 炯 圭

2005年 6月

신축공동주택 실내공기오염물질의
발생원인 및 방출특성에 관한 실험 연구
- 폼알데하이드와 TVOC를 대상으로 -

An Experimental Study on the Major Causes and
Emission Characteristics of Indoor Air Pollutants
in Newly-Constructed Multi-Family Houses
- with emphasis on HCHO and TVOC -

이 論文을 博士學位論文으로 提出함.

2005年 6月

中央大學校 大學院
建築學科 建築計劃 및 環境專攻
柳 炯 圭

柳炯圭의 博士學位論文으로 認定함.

審査委員 長 _____ (印)

審 査 委 員 _____ (印)

審 査 委 員 _____ (印)

審 査 委 員 _____ (印)

審 査 委 員 _____ (印)

中央大學校 大學院

2005 年 6月

제 목 차 례

제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 내용 및 범위	4
1.3 관련 연구동향	6
제 2 장 실내공기오염물질 이론 고찰	13
2.1 실내공기오염물질의 종류	13
2.1.1 폼알데하이드 (HCHO)	13
2.1.2 휘발성유기화합물 (VOCs)	16
2.2 실내공기오염물질 관련 국내외 관련기준	23
2.2.1 국내외 실내공기질 관련 기준	23
2.2.2 국내외 건축자재 인증제도	37
2.3 실내공기오염물질 측정 및 분석방법	45
2.3.1 건축자재 실내공기오염물질 방출시험방법	45
2.3.2 폼알데하이드 및 TVOC 분석방법	46
제 3 장 건축자재 종류별 오염물질 방출강도 분석	49
3.1 건축자재 오염물질 방출강도 시험 및 분석	49
3.1.1 건축자재 방출강도 시험장치	49
3.1.2 폼알데하이드 및 TVOC 분석	51
3.2 건축자재 방출강도 시험결과	55
3.2.1 벽지 시험 결과 분석	55
3.2.2 접착제 시험 결과 분석	63
3.2.3 바닥재 시험 결과 분석	72
3.2.4 기타 건축자재 시험 결과	76
3.3 소 결	79

제 4 장 건축자재 마감구성에 따른 방출강도 분석	81
4.1 마감구성재 방출강도 실험 개요	81
4.2 마감구성재 실험결과 분석	85
4.3 마감구성재 방출강도 감소율	93
4.4 소 결	99
제 5 장 마감구성재 MOCK-UP 비교 실험	101
5.1 Mock-Up 실험 개요	101
5.2 마감구성재 Mock-Up 비교 실험결과	104
5.3 소 결	114
제 6 장 원룸아파트 시공 전과정에 따른 오염물질 방출량 분석	116
6.1 원룸아파트 시공과정 및 실험 개요	116
6.2 원룸아파트 실험결과 분석	124
6.3 소 결	135
제 7 장 결 론	137
참고문헌	141
부 록	149
국문초록	174
영문초록	178

표 차 례

<표 2.1> 폼알데하이드의 인체 위해성	15
<표 2.2> 폼알데하이드의 실내 방출원	15
<표 2.3> 바닥, 벽체 재료 등으로부터의 폼알데하이드 방출율	15
<표 2.4> 미국환경청 TO-14A에서 규정된 독성 VOCs	18
<표 2.5> 실내에서 발생하는 VOCs 물질과 발생원	19
<표 2.6> 건축자재 및 제품에서 방출되는 VOCs	19
<표 2.7> 건축자재로부터의 VOCs 방출율	19
<표 2.8> 주요 VOCs에 대한 주요 노출 경로와 독성	21
<표 2.9> TVOC 농도와 건강에의 영향	21
<표 2.10> WHO와 EU에서 정한 주요 실내공기오염물질과 발생원	22
<표 2.11> 미국 ASHRAE 가이드라인(안)	24
<표 2.12> 캐나다의 주거공간의 실내공기질에 대한 노출 가이드라인(권장) ·	25
<표 2.13> WHO 가이드라인	26
<표 2.14> 노르웨이 국립공중위생원의 실내공기질 가이드라인	27
<표 2.15> 핀란드 환경부의 실내공기질 권장치	27
<표 2.16> 핀란드 FiSIAQ의 실내공기질 인증제도 등급기준	28
<표 2.17> 폴란드의 실내공기질 기준	28
<표 2.18> SCANVAC의 실내 공기환경 분류	29
<표 2.19> 호주 NHMR의 실내공기질 가이드라인	29
<표 2.20> 싱가포르 환경부의 실내공기질 가이드라인	30
<표 2.21> 일본 후생노동성의 실내공기 중 화학물질농도 가이드라인	30
<표 2.22> 일본 국토교통성의 목질계 내장재의 실내공기 관련 항목	31
<표 2.23> 일본 문부과학성의 폼알데하이드와 주요 VOCs에 대한 기준	31
<표 2.24> 국내 각 부처별 실내공기질 관리현황	32
<표 2.25> 실내공기질 관리정책 연혁	33
<표 2.26> 적용대상 다중이용시설	33
<표 2.27> 다중이용시설의 실내공기질 유지기준	34
<표 2.28> 다중이용시설의 실내공기질 권고기준	34
<표 2.29> 다중이용시설의 환기설비 설치기준	35

<표 2.30> 건축자재별 방출기준	35
<표 2.31> 국내외의 폼알데하이드 및 VOCs 기준 비교	36
<표 2.32> 미국 카펫과 피혁협회의 카펫 인증 프로그램	38
<표 2.33> 미국 파티클보드협회의 인증 프로그램	38
<표 2.34> 미국 Green Guard에 의한 친환경 가구 및 전자재 인증 프로그램	38
<표 2.35> 미국 HUD와 HPVA의 폼알데하이드 인증 프로그램	38
<표 2.36> 캐나다의 접착제, 페인트, 카펫 등의 전자재 용도별 VOCs 함유량 및 독성물질 기준	39
<표 2.37> 핀란드의 실내건축마감구성재료 분류체계	39
<표 2.38> SCANVAC 건축자재의 분류	40
<표 2.39> 독일 GEV의 건축자재 인증기준	40
<표 2.40> 독일 환경부와 연방재료연구소의 RAL-UZ38 기준	41
<표 2.41> 일본 JIS의 폼알데하이드 방출기준	41
<표 2.42> 일본 JAS의 합판 등의 폼알데하이드 방출량 기준	42
<표 2.43> HB 건축자재의 인증등급	43
<표 2.44> KS 규격의 HCHO 방출량 기준	43
<표 2.45> 목재 바닥재의 HCHO 방출량 기준(예)	44
<표 2.46> HB마크, KS마크, 환경마크의 비교	44
<표 3.1> 건축자재 실내공기오염물질 방출시험장치 각부 설명 및 규격	50
<표 3.2> 소형챔버의 시험 조건	51
<표 3.3> 건축자재 오염물질 채취방법	51
<표 3.4> HPLC 규격 및 분석 조건	52
<표 3.5> 열탈착/저온농축-GC/MS 규격	53
<표 3.6> 열탈착/저온농축-GC/MS 분석조건	54
<표 3.7> 시험 대상 건축자재 수량 및 종류	55
<표 3.8> 벽지 종류별 HCHO, TVOC 방출강도 및 6종 VOCs 방출량	57
<표 3.9> 벽지 종류별 HCHO 방출강도 비교	58
<표 3.10> 벽지 종류별 TVOC 방출강도 비교	59
<표 3.11> 벽지 종류별 VOCs 방출량	60
<표 3.12> 접착제의 분류	63

<표 3.13> 접착제 용도별 HCHO 및 TVOC 방출강도	64
<표 3.14> 접착제 용도별 HCHO 방출강도 비교	66
<표 3.15> 접착제 용도별 TVOC 방출강도 비교	67
<표 3.16> 접착제 용도별 6종 VOCs 방출량	69
<표 3.17> 바닥재 종류별 HCHO, TVOC 방출강도 및 6종 VOCs 방출량	73
<표 3.18> 온돌마루바닥재와 톱바닥재의 HCHO 방출강도 비교	73
<표 3.19> 온돌마루바닥재와 톱바닥재의 TVOC 방출강도 비교	74
<표 3.20> 기타 건축자재의 HCHO 및 TVOC 방출강도	77
<표 3.21> 기타 건축자재의 6종 VOCs 방출량	78
<표 4.1> 마감구성재에 사용된 건축자재	82
<표 4.2> 마감구성재 실내공기오염물질 방출강도 실험결과	85
<표 4.3> 마감구성재 TVOC 방출강도 감소율	92
<표 4.4> 마감구성재의 방출강도 감소율 함수	93
<표 4.5> 방출강도 감소율 계산 결과와 실험결과 비교	94
<표 4.6> 방출강도 감소량 예측	95
<표 4.7> 인증등급 기준에 도달하기 위한 각 마감구성재의 경과 시간	98
<표 5.1> Mock-Up 실험실에 시공된 건축자재	102
<표 5.2> Mock-Up 실험실 시공과정별 HCHO 방출량 변화	104
<표 5.3> Mock-Up 실험실 시공과정별 TVOC 방출량 변화	106
<표 5.4> 공동주택 6종 VOCs 국외 가이드라인	109
<표 5.5> A실의 6종 VOCs 방출량	109
<표 5.6> B실의 6종 VOCs 방출량	110
<표 6.1> 원룸아파트 시공과정별 실험 일정	123
<표 6.2> 거실 시공과정별 HCHO 및 TVOC 방출량 변화	124
<표 6.3> 욕실 시공과정별 HCHO 및 TVOC 방출량 변화	124
<표 6.4> 거실의 시공과정별 6종 VOCs 방출량 변화	130
<표 6.5> 욕실의 시공과정별 6종 VOCs 방출량 변화	131

제 목 차 례

(그림 1.1) 연구흐름도	5
(그림 2.1) 포름알데히드의 반응식	46
(그림 3.1) 실내공기오염물질 방출시험장치 설계도	49
(그림 3.2) 시험챔버 시스템 계통도	50
(그림 3.3) 고성능 액체크로마토그래피 (HPLC)	52
(그림 3.4) 카르보닐 7종 표준물질 (예)	52
(그림 3.5) 카르보닐 7종 표준물질 (분석)	52
(그림 3.6) HCHO 검량선	53
(그림 3.7) 기체크로마토그래피(GC-MSD)와 열탈착기(ATD)	53
(그림 3.8) Toluene(200ng)을 포함한 60종 VOCs 표준물질	54
(그림 3.9) Toluene 검량선	54
(그림 3.10) 벽지 종류별 HCHO 방출강도 비교	58
(그림 3.11) 벽지 종류별 TVOC 방출강도 비교	59
(그림 3.12) 종이벽지와 실크벽지의 HCHO 크로마토그램	60
(그림 3.13) 종이벽지의 TVOC 크로마토그램	61
(그림 3.14) 실크벽지의 TVOC 크로마토그램	62
(그림 3.15) 접착제 용도별 HCHO 방출강도 비교	67
(그림 3.16) 접착제 용도별 TVOC 방출강도 비교	68
(그림 3.17) 벽지용 접착제의 HCHO 크로마토그램	70
(그림 3.18) 목재용 접착제 중 Acetaldehyde가 검출된 제품의 HCHO 크로마토그램	70
(그림 3.19) PIB가 주성분인 목공용 접착제의 TVOC 크로마토그램	71
(그림 3.20) 주방 및 욕실 타일 접착제의 TVOC 크로마토그램	71
(그림 3.21) 온돌마루바닥재와 립바닥재의 HCHO 방출강도 비교	74
(그림 3.22) 온돌마루바닥재와 립바닥재의 TVOC 방출강도 비교	74
(그림 3.23) 온돌마루바닥재와 립바닥재의 HCHO 크로마토그램비교	75
(그림 3.24) 온돌마루바닥재와 립바닥재의 TVOC 크로마토그램비교	75

(그림 4.1) 마감구성재 시료고정틀	84
(그림 4.2) 마감-A 시료 및 고정	84
(그림 4.3) 마감-B 시료 및 고정	84
(그림 4.4) 마감-C 시료 및 고정	84
(그림 4.5) 마감-D 시료 및 고정	84
(그림 4.6) 마감-E 시료 및 고정	84
(그림 4.7) 마감-A의 방출강도 실험결과	86
(그림 4.8) 마감-B의 방출강도 실험결과	87
(그림 4.9) 마감-C의 방출강도 실험결과	88
(그림 4.10) 마감-D의 방출강도 실험결과	90
(그림 4.11) 마감-E의 방출강도 실험결과	91
(그림 4.12) 마감-A의 TVOC 방출강도 감소율	96
(그림 4.13) 마감-B의 TVOC 방출강도 감소율	97
(그림 4.14) 마감-C의 TVOC 방출강도 감소율	97
(그림 4.15) 마감-D의 TVOC 방출강도 감소율	97
(그림 4.16) 마감-E의 TVOC 방출강도 감소율	98
(그림 5.1) Mock-Up 실험실 평면도	101
(그림 5.2) Mock-Up 실험실 외관	102
(그림 5.3) Mock-Up 실험실 내부	102
(그림 5.4) 온돌마루 시공	103
(그림 5.5) 립바닥 시공	103
(그림 5.6) Mock-Up 실험실 HCHO 방출량 비교	104
(그림 5.7) Mock-Up 실험실 TVOC 방출량 비교	107
(그림 5.8) 시공과정별 Benzene 방출량 변화	111
(그림 5.9) 시공과정별 Toluene 방출량 변화	111
(그림 5.10) 시공과정별 Etylbenzene 방출량 변화	112
(그림 5.11) 시공과정별 Xylene 방출량 변화	112
(그림 5.12) 시공과정별 Styrene 방출량 변화	113
 (그림 6.1) 원룸아파트 평면도	117
(그림 6.2) 기존 시설 철거	117
(그림 6.3) 설비 시공	118

(그림 6.4) 환기시스템 시공	118
(그림 6.5) 벽체 및 바닥 시공	119
(그림 6.6) 욕실방수 및 타일 시공	120
(그림 6.7) 주방타일 시공	120
(그림 6.8) 도배 시공	121
(그림 6.9) 온돌마루 시공	121
(그림 6.10) 가구 반입	122
(그림 6.11) 원룸아파트 완성	122
(그림 6.12) 거실과 욕실의 시공과정별 HCHO 방출량 변화	125
(그림 6.13) 거실과 욕실의 시공과정별 TVOC 방출량 변화	126
(그림 6.14) 전실 타일 접착제의 TVOC 크로마토그램	128
(그림 6.15) Mock-Up 실험실과 원룸아파트의 TVOC 방출량 비교	129
(그림 6.16) 거실과 욕실의 시공과정별 Benzene 방출량 변화	132
(그림 6.17) 거실과 욕실의 시공과정별 Toluene 방출량 변화	132
(그림 6.18) 거실과 욕실의 시공과정별 Ethylbenzene 방출량 변화	133
(그림 6.19) 거실과 욕실의 시공과정별 Xylene 방출량 변화	134
(그림 6.20) 거실과 욕실의 시공과정별 Styrene 방출량 변화	134

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

1970년대 이후 우리사회는 급속한 산업화 및 경제발전을 이루었으나, 다른 한편으로는 환경오염이라는 심각한 문제를 불러 일으켰다. 특히, 현대인은 대부분의 시간을 건물 내에서 생활하고 있음을 고려할 때, 실내공기질은 재실자의 건강과 직결되어 있어 문제가 더욱 심각하다. 건물에서 발생하는 실내공기오염물질은 거주자들의 실내활동과 건축자재 및 생활용품 등에서 배출되는 오염물질로서, 그 종류로는 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 이산화질소(NO₂), 아황산가스(SO₂), 오존(O₃), 미세먼지(PM10), 중금속(Heavy Metal), 석면(Asbestos), 폼알데하이드(HCHO), 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds : VOCs), 미생물성 물질(Microbic Substance), 병원성 세균, 라돈(Rn) 등을 들 수 있다. 또한, 건물의 실내공기질은 실내의 오염도와 오염원의 존재여부 및 환기량과 기상상태에 따라 달라지며, 실내에서의 작업종류와 행위에 따라 약 900여종 이상의 다른 오염물질이 발생하는 것으로 알려지고 있다¹⁾. 그럼에도 불구하고, 실내공기질은 그 동안 에너지절약 설계 및 시공에 따른 건물의 기밀화와 단열 강화에 따라 환기부족 현상이 생겨 날로 악화되어 가고 있으며, 대기오염이 심각한 지역에서는 정화되지 않은 외기가 실내로 도입되고 있어 현대인의 건강을 해치는 가장 중요한 요인이 되고 있다. 이러한 상황에서 최근 신축공동주택 입주자들 중에는 두통, 현기증, 메스꺼움, 졸음, 눈의 자극, 집중력 감퇴, 아토피성 피부염 등 각종 질환을 호소하는 건물병증후군(Sick Building Syndrome : SBS) 및 새집증후군(Sick House Syndrome : SHS)등의 문제까지 발생하여 현대인의 건강을 크게 위협하고 있는 실정이다.

최근 환경부에서 이와 같은 문제의 심각성을 인식하기 시작하여 2003년 4월에 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리법”을 제정하여 공포하였고, 2004년 5월 30일부로 시행하고 있다. 이에 따라, 국내 지하역사, 지하상가, 도서관, 박물관, 미술관, 의료기관, 실내주자창, 터미널 및 대합실, 보육시설, 장례식장, 찜질방, 대형상가 등 17개 다중이용시설의 관리책임자는 환기설비현황, 실내공기질 측정결과를 매년 1월 31일까지 시도지사에게 보고하여야 하며, 여기에 100세대 이상의 신

1) Hays, S.M. 외, Indoor Air Quality : Solutions and Strategies, Mc Graw-Hill, Inc., New York, p.1, 1995

축공동주택을 포함하여 폼알데하이드 및 VOCs 등의 오염물질을 측정하여 주민 입주 3일전까지 해당 시장·군수·구청장에게 제출하여야 한다.²⁾

공동주택에서의 실내공기오염은 각종 건축자재 등에서 방출되는 폼알데하이드와 VOCs가 가장 큰 원인으로 알려져 있다. 2000년 현재 우리나라에 지어진 주택은 단독주택이 37.1%, 아파트, 47.7%, 연립주택 7.4%, 다세대주택 4.1%를 차지하며³⁾, 2003년 현재 건설된 아파트와 연립주택을 포함한 공동주택은 전체 주택의 80.1%⁴⁾로 주택건설에 차지하는 비중이 매우 크다. 따라서, 대량으로 건설되는 공동주택의 특성상, 부적절한 건축자재의 선정과 공법으로 인한 피해는 일반 건물과 비교하여 매우 심각하게 나타난다.

국내의 공동주택 실내공기질과 관련한 연구는 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리법” 제정 전후로 증가하는 추세에 있으며, 크게 건축자재 오염물질 방출강도 측정, 공동주택 현장측정, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 실내공기질 예측 그리고 실내공기질 개선 연구로 구분할 수 있다. 그러나 선진국과는 달리 연구 기간의 부족으로 매우 기초적인 데이터만 제시하고 있을 뿐, 실내공기질의 뚜렷한 해결 방안은 제시하지 못하고 있는 실정이다.

이러한 상황에서 공동주택의 실내공기질 문제를 조속히 해결하기 위해서는 일반시민, 민간단체, 학계, 산업계, 정부 등이 공동으로 참여하여 기술적, 제도적 측면에서 노력을 기울여야 하며, 관련 연구의 체계적이고 종합적인 접근이 필요하다. 즉, 건축자재 오염물질 방출강도 측정과 관련해서는 건축자재 사용용도, 구성성분 등으로 건축자재를 분류·시험하고, 이와 함께 여러 건축자재들의 조합으로 이루어진 벽과 바닥과 같은 건축부위의 오염물질 방출특성에 관한 데이터베이스 마련이 시급하다. 또한, 공동주택 현장측정과 관련해서는 건축 시공 전반에 걸쳐 시공과정 및 방법을 검토하는 것이 필요하다. 특히, 복잡 다양한 공동주택 시공과정을 고려하지 않은 상황에서 제시되는 실내공기질 개선방안은 매우 비효율적인 것이 될 수 있다. 이러한 연구를 기본으로 건축자재에서 발생하는 실내공기오염물질 발생의 근본 원인을 파악하면, 컴퓨터 시뮬레이션 등을 통한 실내공기질 예측과, 이에 따른 적절한 실내공기질 개선 방안이 마련될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 2006년부터 시행될 예정인 공동주택의 환기시스템 설치규정⁵⁾과

2) 지하생활공간공기질관리법시행령, 환경부, 2003

3) <http://kosis.nso.go.kr>

4) 통계청 (2003), 건설정보

5) 주택법중개정법률안, 건설교통부, 2005

관련해서도 재질자 뿐만 아니라 건축자재에서 발생하는 오염물질을 고려하여 적절한 시스템을 도입하는 것이 바람직 할 것이며, 이때, 실내공기오염물질을 최대한 저감시킨 후, 시스템을 도입하면 매우 효율적인 운영이 가능할 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구는 공동주택에 사용되는 건축자재와 시공과정에서 발생하는 실내공기오염물질의 발생원인과 방출특성을 파악하여, 공동주택의 실내공기질 개선 방안을 마련하기 위한 기초 연구를 수행하였다. 국내외 문헌을 통하여 신축공동주택과 건축자재와 관련한 실내공기오염물질의 인체 영향과 국내외 기준 그리고 측정 및 분석 방법을 고찰하였다. 소형챔버를 이용하여 공동주택에 사용되는 주요 건축자재를 사용용도와 구성성분으로 분류하여 오염물질 방출강도를 시험하였고, 여러 건축자재들의 조합으로 이루어진 벽과 바닥과 같은 건축부위의 오염물질 방출특성을 파악하기 위하여 시험한 건축자재 일부를 대상으로 마감구성재를 제작하여 방출강도를 실험하였다. 또한, 소형챔버에서 실시한 마감구성재를 신축공동주택의 단위 공간을 재현한 두 개의 Mock-Up 실험실에 적용하여 실제 조건에서의 변화를 비교하였으며, 실물 원룸아파트의 시공 전과정에서의 실내공기오염물질 방출량 변화 패턴을 분석하였다.

이 연구 결과는 공동주택의 실내공기오염물질의 주요 발생원인 및 방출특성을 밝혀냄으로서 건축설계와 시공의 기초 자료로 활용하여 공동주택의 건강한 실내공기질을 유지하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

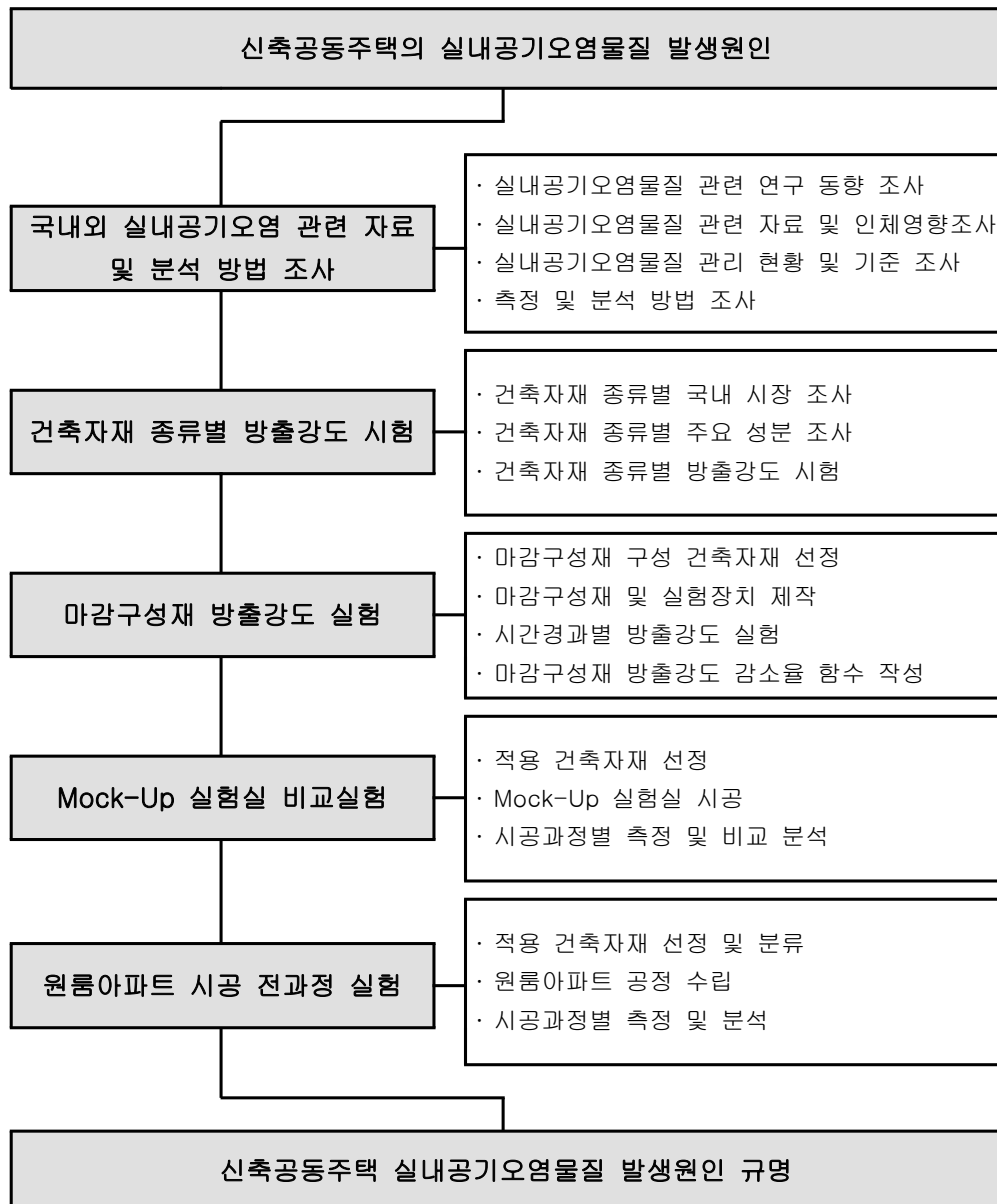
1.2 연구의 내용 및 범위

본 연구에서 수행한 연구 내용은 다음과 같다.

- 1) 자료를 통하여 공동주택 및 건축자재와 관련한 실내공기오염물질의 종류와 국내외 기준을 고찰하고, 연구에 필요한 측정 및 분석 방법을 조사하였다. 특히, 공동주택 실내에서 발생 가능한 실내공기오염물질 중 건축자재에서 발생하는 오염물질을 중심으로 인체에 미치는 영향과 기준 등을 고찰하였다.
- 2) 소형챔버를 이용하여 국내에서 생산되는 주요 건축자재 100종을 대상으로 사용용도와 구성성분으로 분류·시험하여 건축자재에서 방출되는 실내공기오염물질의 특성을 파악하였다.
- 3) 여러 건축자재들의 조합으로 이루어진 벽과 바닥과 같은 건축부위의 오염물질 방출특성을 파악하기 위하여 실제 시공과 동일하게 마감구성재를 제작하고, 소형챔버를 이용하여 방출강도를 실험하여 건축자재 구성으로 인한 방출특성과 시간 경과에 따른 방출강도 변화 그리고 실내공기에 영향을 미치는 주요 건축자재를 파악하였다.
- 4) 실제 공동주택 현장 적용시 마감구성재의 오염물질 방출특성을 관찰하기 위하여 신축공동주택의 단위공간을 재현한 두 개의 Mock-Up 실험실에 마감구성재를 적용하여 시공과정별로 실내공기오염물질 방출량 변화를 비교·분석하였다.
- 5) 실제 공동주택은 복잡 다양한 건축자재와 시공과정을 통하여 건설되므로, 실물 원룸아파트를 건설하여 공동주택 시공 전과정에서 실내공기질에 영향을 미치는 건축자재 및 시공방법을 파악하였다.

본 연구의 측정 및 분석은 2004년 6월 환경부가 제정한 “실내공기질공정시험 방법”을 준수하였으며, 대상 실내공기오염물질은 “다중이용시설등의 실내공기질관리법”의 신축공동주택 측정 항목인 폼알데하이드와 6종 VOCs, 그리고 TVOC로 하였다.

(그림 1.1)은 본 연구의 흐름도이다.



(그림 1.1) 연구흐름도

1.3 관련 연구동향

실내공기질(IAQ : Indoor Air Quality)에 관한 국내 연구는 1980년대 후반부터 소수의 연구자에 의해서 진행되어 오고 있으며, 2004년 5월 다중이용시설등의실내공기질관리법의 제정 전후로 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 실내공기질 연구는 크게 실내 생활환경에서의 오염물질측정, 건축자재 오염물질 방출강도 측정, 그리고 환기성능 측정 및 개선방안에 관한 연구로 구분된다.

1990년 이전의 실내공기질 측정은 주로 이산화질소(NO_2)의 측정방법과 개인용 측정기구를 이용한 주택(거실, 주방) 농도, 실외농도 및 개인 노출량을 제시하였다. 이후, 1990년대 중반까지는 대부분 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2), 이산화질소(NO_2), 아황산가스(SO_2), 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 보고 되고 있다. 특히, 폼알데하이드와 VOCs는 발암성과 유해성을 내포하고 있어 최근 크게 문제시되고 있는 실정이며, 이에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다.

최근 사회적인 중요성이 부각되고 있는 VOCs에 대한 연구가 시작 된지는 그리 오래되지 않았으며 공동주택, 주택, 사무실, 식당, 지하상가, 지하주차장, 백화점 등과 일부 건축자재를 대상으로 실내 VOCs에 대한 연구가 진행되고 있다.

신혜수 등⁶⁾은 1993년 3월초~4월말까지 서울시에 소재하는 일반주택 10곳과 사무실 4곳에 대한 실내·외의 VOCs를 조사하였으며, 측정 결과 Benzene, Toluene, Ethylbenzene, o-Xylene, m+p-Xylene의 농도가 실외보다 실내에서 각각 1.4배, 1.2배, 1.3배, 2.4배, 1.8배 높은 것으로 나타났다. 실내가 실외에 비해 VOCs의 농도가 높은 것은 주택의 경우 취사 및 난방연료의 사용, 거주자의 흡연, 환기의 부족, 외부로부터 자동차 배기가스 유입, 건축자재의 영향을 고려하고 있으며, 일반 사무실의 경우에는 재실자의 흡연, 석유난로의 사용과 병원 사무실의 경우에는 실내 생활용품이나 각종 약품으로부터의 방출 영향이 있었던 것으로 조사되었다. Toluene의 경우는 특히 흡연자의 유·무에 따라 가장 농도차가

6) 신혜수 외, 실내외 공기중 휘발성 유기화합물(VOCs)의 농도조사에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 제9권 제4호3, pp.310~390, 1993

큰 것으로 나타났으며, 담배연기는 측정된 VOCs 성분들의 농도에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

송정한 등⁷⁾은 1995년 6월~7월, 1995년 12월~1996년 1월에 걸쳐 VOCs의 농도를 계절적으로 비교한 결과, 겨울철이 여름철에 비해 약 1.9배에서 25배 이상이나 높은 것으로 조사되었으며, 겨울철의 실내농도 또한, 실외보다 높았다. 실제로 Benzene과 Toluene의 실내농도는 여름철에 $0.7\mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 겨울철에는 $17.8\mu\text{g}/\text{m}^3$, $77.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 이러한 원인으로는 겨울철의 밀폐된 실내에서의 환기조건, 난방시설과 실내·외의 배출원, 온도, 기후조건 등이 영향을 준 것으로 추정하고 있다. 또한, 대구지역의 공중이용시설 중 지하상가, 백화점, 은행, 병원, 버스터미널, 역, 도서관의 실내·외 공기 중 VOCs의 농도가 전 항목에 걸쳐 실내가 실외에 비해 높은 농도를 나타내었다. 방향족화합물의 경우는 실내의 경우 역과 도서관을 제외한 전 지점에서 Toluene의 농도가 가장 높았으며, o-Xylene, m,p-Xylene, Benzene의 순서로 높게 나타났다. 폼알데하이드를 포함한 카르보닐화합물의 농도 역시 실내가 실외에 비해 높게 나타났다.

김만구 등⁸⁾은 1996년 왁스청소에 기인한 실내공기 중 VOCs의 농도변화를 조사하였으며, 실내에서 왁스청소로 인해 발생하는 주요 VOCs들은 Nonane, Decane, Undecane 등 가지 없는 사슬형 포화화합물과 C_2 -Benzene, C_3 -Benzene 류도 존재하는 것이 확인되었다. 또한, 실내공기질에 실외공기가 미치는 영향은 환기상태나 건물의 구조에 따라 다르게 나타났다. 시간의 경과에 따른 Nonane의 농도변화를 살펴보면 왁스청소 후 1시간 뒤에는 $1,276.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 3일 후 $832.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 청소 당일의 65%정도 줄었고, 15일 후에 0.3%로 감소되는 것으로 조사되었다.

최근의 연구로 전국신축 1년 이내 아파트를 대상으로 폼알데하이드 및 VOCs 오염도에 대한 실태조사⁹⁾를 실시한 결과, 폼알데하이드 오염수준은 평균 $150.41\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, VOCs 중 Toluene의 평균 농도는 $127.33\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. Ethylbenzene 및 Xylene의 평균 농도는 각각 $30.03\mu\text{g}/\text{m}^3$, $59.60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, Benzene의 평균 농도는 $2.36\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 오염물질의 총별 농도는 유의한 차이가 나타나지 않았으

7) 송정한 외, 대구지역 공중이용시설의 실내공기 중 휘발성 유기화합물의 농도(방향족과 카르보닐계 화합물을 대상으로), 대한환경공학회 추계학술 연구발표회 논문초록집, pp 344~347, 1995

8) 김만구 등, 왁스청소에 기인한 실내공기 중 휘발성유기화합물의 농도변화, 한국대기보전학회지, 제13권 제3호, pp. 221~229, 1991

9) 전국 신축공동주택 실내공기질 실태조사, 국립환경연구원, 2004

며, 평형별로는 폼알데하이드의 경우는 평형이 증가할수록 농도가 감소하는 경향을 보인 것과는 달리 VOCs의 농도는 증가하였다. 온습도와 오염물질의 농도는 상관성이 작았으나, 폼알데하이드의 경우 습도가 증가할수록 유의한 차이를 나타내었다. 입주시기별 폼알데하이드 및 VOCs 오염도는 입주기간이 길어질수록 대체적으로 감소하는 경향을 나타내었다. VOCs 4종에 대한 분포특성은 Toluene이 약 58%로 가장 많은 비중을 차지하였으며, Xylene, Etylbenzene, Benzene 순이었다. 국내 공동주택 실내공기질의 폼알데하이드 및 VOCs의 오염수준은 2000년 일본의 실태조사 결과와 유사한 것으로 조사되었다.

아파트에 사용되는 각종 건축자재에서 배출되는 폼알데하이드, VOCs 등 각종 오염물질들이 아토피성 피부염, 두통 등 각종 질환의 원인이 되고 있으며, 이들 오염물질들은 신축한 지 5년이 지나도 계속 배출되고 있는 것으로 나타났다. 최근 들어서는 방음 밀폐효과 등 건축기술의 발달로 환기마저 잘 안돼 “독가스실에 갇혀 지내는 셈”이라고 전문가들은 지적하고 있다. 이에 따라 신축아파트 모델하우스의 경우, 건축자재에서 나오는 각종 오염물질로 도우미들이 쓰러지는 경우가 발생하였다. 2003년 2월 강남구 역삼동 B아파트 모델하우스에서 도우미들이 종일 새 건물에서 나오는 휘발유·벽지 냄새로 현기증을 느끼다 결국 쓰러진 사례가 발생하였으며, 분당, 일산 등 거의 모든 모델하우스에서 다반사로 일어나고 있는 것으로 보고 되고 있다. 또한, 알레르기 비염의 원인이 실내공기 중 폼알데하이드 때문이라는 연구결과가 있으며, 40만명 이상으로 추산되는 아토피 피부염 환자들도 실내공기와 상관관계가 높은 것으로 전문가들은 보고 있다. 초등학교 400여 만명 중 천식을 앓는 10% 내외도 실내공기질과 관련이 있는 것으로 알려졌다.¹⁰⁾

건축자재로부터의 폼알데하이드와 VOCs 방출실험은 제한적인 건축자재를 대상으로 연구가 진행되었다. 김신도 등¹¹⁾은 소형챔버를 이용하여 온도와 상대습도, 환기량 등을 고려한 후 5종류의 건축자재를 대상으로 시간의 경과에 따른 VOCs와 폼알데하이드의 방출특성을 조사하였다.

박진철 등¹²⁾은 콘크리트, 석고보드, 진흙, 운모, 페인트 등을 대상으로 난방시와

10) 실내는 독가스실? 전자재서 오염물질 배출, 조선일보 2003. 7. 20. 기사

11) 김신도 외, 가구에서 발생하는 VOCs와 Formaldehyde의 방출특성에 관한 연구, 한국대기보전학회 추계학술대회논문집, pp.163~164, 2001

12) 박진철 외, 건축재료에서의 실내공기오염물질 발생농도 측정연구, 한국건축설비학회지, pp.126~137, 1998

비난방시 단위표면적에서 발생하는 폼알데하이드와 VOCs의 농도를 측정하였다. 실험실은 1m³의 크기에 50mm철재 앵글프레임에 함석마감을 하였으며, 실험에 사용된 건축자재로는 콘크리트, 석고보드, 진흙, 운모, 페인트 등을 대상으로 단위표면적에서 발생하는 폼알데하이드와 VOCs의 농도를 측정하였고, 측정시의 온도조건을 난방시와 비난방시로 구분하였다. 측정에 사용되는 페인트는 수성과 유성으로 구분하였으며, 석유화학제품인 국내제품과 천연소재를 근거로 하는 외국제품을 대상으로 하였다. 측정결과를 살펴보면 비난방시(6.9℃~7.4℃) 석유화학제품인 국내의 유성페인트에는 VOCs 중 Toluene, Xylene이 매우 높게 검출되었으나 천연원료를 사용하는 외국의 유성페인트는 VOCs성분이 거의 검출되지 않은 것을 볼 수 있었다. 또한, 수성페인트의 경우, 국내제품은 Benzene, Toluene이 검출된 반면 외국제품은 폼알데하이드와 VOCs가 전혀 검출되지 않았다. 난방시(24.4℃~26.5℃) 폼알데하이드는 유성페인트에서 국내제품의 경우, 외국제품에 비해 약 3.4배 정도 높게 검출되었고 VOCs는 Benzene, Toluene, Xylene이 검출되었으며, Toluene은 외국제품에 비해 약 1.7배 정도 높게 나타났다. 국내의 수성페인트는 폼알데하이드와 Toluene, Benzene이 주로 검출되었으나 외국의 제품은 Benzene만 일부 검출됨을 알 수 있었다.

임경선 등¹³⁾도 소형챔버를 이용하여 7가지 건축자재를 실험대상으로 하여 측정하였다. 임경선 등의 측정결과를 살펴보면 건축자재의 구성과 제조방법에 따라 다소 차이는 있으나 대부분의 건축자재가 시간이 경과할수록 VOCs 방출량이 증가하다가 일정한 시간이 되면 점점 감소하는 것을 볼 수 있었다.

삼성기술연구소의 조사에서 독일제 비닐 바닥재가 4898 $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$, 일반 벽지 3833 $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$, 페인트 1861 $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$, 핀란드제 비닐 바닥재 1407 $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$, 석고보드가 302 $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$ 를 배출하는 것으로 측정되었다. 폼알데하이드는 가구·단열재·페인트·벽지·타일 등에서 평균 25~130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 검출되었다¹⁴⁾.

1987년에 설립된 한국공기청정협회는 2004년 3월부터 친환경건축자재 단체품질 시험방법에 따라 각종 건축물의 내장재료에 사용되는 판, 판넬과 보드 등의 제품, 벽지와 카펫, 바닥재 등 물 형태의 제품과 이들의 시공에 사용되는 접착제, 페인트 등 건축자재에서의 VOCs 및 알데하이드류의 방출강도 측정 분석하여 이를 공인하는 인증서를 발급하고 있다. 단체품질인증을 수행하고 있는 기관은 중앙대학교, 한국건설기술연구원, 대한주택공사 주택도시 연구원, 경원대학교,

13) 임경선 등, 제17회 공기청정세미나집, 한국공기청정협회, 2000

14) 윤동원 외, 오염물질 방출 건축자재 선정관련연구, 환경부, 2003

서울시립대학교, 한양대학교, 산업기술시험원, 과학기술분석센터, 한국원사직물시험연구원, 순천제일대학 그린전남환경 종합센터, 한국전자재시험연구원으로 총 12개 개 기관이 시험업무를 맡아 수행하고 있다. 2005년 5월 현재까지 공기청정 협회에서 인증서를 부여한 제품은 총 200여종이 넘는다.

외국의 경우, 실내공기질에 대한 중요성은 구미 각국에서 1970년대 초부터 대두되기 시작하여 실내공기오염의 측정평가, 측정기구 개발 등 실내공기오염에 대한 다양한 연구가 진행 중이며, 각 실내오염물질에 대한 기준치 설정 및 관리 기술개발에 심혈을 기울이고 있다. 1980년대의 연구는 실내오염물질의 농도조사뿐만 아니라 각 물질의 발생원 추정 및 인체영향 등을 조사하는데 그 목적을 두고 있었고, 1990년대에는 실내오염물질들의 위해성 평가 및 관리기술 개발, 각종 신기술을 이용한 저감 방법 등에 초점을 맞추어 연구가 이루어지고 있다. 또한, 각종 실내공기오염의 발생원 확인, 노출평가, 독성실험, 역학조사, 건강 위해성 평가를 계속적으로 진행하여 오염물질에 대한 기준치 설정 및 오염관리를 수행해 오고 있다.

미국의 경우, 실내공기오염에 관한 연구수행을 위하여 기관 및 학회가 발족하였으며, 미국 정부는 EPA(Environmental Protection Agency)에 투자와 지원을 통하여 실내공기오염 및 이로 인한 유해평가 연구를 실시하고 있다¹⁵⁾. 또한, ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers)은 1992년 건물의 환기효율에 관한 국제 심포지엄¹⁶⁾을 개최하였으며, 건물에서의 환기효율 평가를 위한 시뮬레이션 및 실험, 제어기법 등에 관한 다수의 자료를 발표하였다.

NIOSH(National Institute for Occupational Safety)와 OSHA(Occupational Safety and Health Administration) 등은 작업환경과 비작업환경에 있어서 실내오염물질이 인체에 미치는 영향을 조사하고 이를 기반으로 오염물질별 기준치를 설정하기 위한 연구가 이루어지고 있다. 특정유해물질에 관한 연구도 NAS(National Academy of Science)등 각 기관에 의해 연구되고 있는데 라돈과 같은 방사능을 지닌 실내공기오염물질의 경우 NCRP(국립방사능 방어 및 측정위

15) U.S. Environmental Protection Agency. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment. Carcinogen Assessment Group, Office of Health and Environmental Assessment, 1986

16) ASHRAE, 1992 International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, ASHRAE, 1992

원회), ICRP(국제방사성 방어위원회)을 통하여 적절한 조사 활동을 벌이고 있다.

독일의 경우, 실내 VOCs의 농도가 교통량이 많은 반면 환기가 잘 이루어진 도시지역에서 시골지역 보다 낮게 조사된 사례 등을 포함하여 실내공기질 관리와 관련한 많은 기초 자료들을 제공하고 있다¹⁷⁾. 또한, 실내에서 사용되는 제품의 오염물질 방출조사를 통하여 오염물질 중 VOCs의 방출량과 그 영향에 대하여 고찰하였다¹⁸⁾.

한편, 유럽공동체에서 연구사례를 보면, 실내공기질 중 TVOC 오염수준이 높고 오염원 제거에 노력을 기울여야 한다고 보고하고 있으며, 전반적인 실내공기질에 관한 꾸준한 연구와 더불어 VOCs, HVAC, ETS, 라돈 등의 물질에 관한 보다 심층화된 연구 경향을 보여주고 있다¹⁹⁾. 이외에도 유럽의 56개의 사무건물의 실내공기질 연구사례에서 CO, CO₂, VOCs는 국제기준과 유럽기준에 적합하지만 HVAC(Heating, Ventilating and Air Conditioning) 시스템사용에 있어서 저에너지 사용을 위한 연구가 필요함을 제시하였다²⁰⁾.

브라질은 1995년 12월~1996년 8월까지 주택과 사무실의 신축, 개조에 따른 TVOC의 농도변화에 대해 연구하였으며, 주방연료, 세척물질, 페인트, 접착제, 플라스틱, 타일, 카펫트, 가구, 벽지, 생활용품, 복사기, 컴퓨터 프린터로부터 실내오염의 VOCs가 발생하는 것으로 보고하고 있다. 건축물의 준공 초기 실내·외 TVOC 농도는 각각 $688 \sim 1,089.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $215.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 2개월 경과 후 실내의 TVOC 농도는 $54.5 \sim 625.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하였다. 또한, 6개월 후 대략 $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하는 것으로 나타났다. 검출되는 물질로는 지방족과 방향족탄화수소가 가장 높았고 실내에서의 TVOC 농도는 실외보다 2~4배정도 높았으며, 실내공기오염물질의 주요 발생원인으로는 가구, 페인트, 카펫트 등이며 실외 오염원으로는 자동차 연소에 의한 배기가스로 보고되고 있다²¹⁾.

17) Markus Reitzig 외, VOC Emissions after Building Renovations : Traditional and Less Common Indoor Air Contaminants, Potential Sources, and Reported Health Complaints, Indoor Air, Vol 8, No 2, pp.91~102, 1998

18) Horn, W. 외, VOC Emissions from Cork Products for Indoor Use, Indoor air, v.8 no.1, pp.39-46, 1998

19) L. Molhave 외, Total Volatile Organic Compounds(TVOC) in Indoor Air Quality Investigations, Indoor Air, pp.225-240, 1997

20) Bluyssen, P. M. 외, European Indoor Air Quality Audit Project in 56 Office Buildings, Indoor air, v.6 no.4, pp.221-238, 1996

21) De Aquino Neto, F. R. 외, Assessment of indoor and outdoor TVOC in a renovated office in Rio de Janeiro, Brazil, Indoor air quality and climate, pp.352-357, 1999

외국의 건축자재에서 발생하는 VOCs에 대한 연구 활동은 오래전부터 많은 관심을 보이고 있으며, 활발한 연구가 진행되고 있는 것을 볼 수 있다. 외국은 건축자재에서 발생하는 VOCs에 대해 TVOC의 개념을 많이 사용하고 있으며 연구의 분야 또한, 매우 다양하다.

실내 건축자재 중에서 페인트에서 발생하는 VOCs의 방출특성에 관한 연구로 미국에서 발표된 것에 의하면, 챔버를 이용하여 철판과 석고보드에 동일한 페인트를 칠하고 2주 동안 측정한 결과, 철판에 칠한 페인트보다 석고보드에 칠한 페인트에서 VOCs가 2~10배 정도 많이 방출된 것으로 보고되었다²²⁾.

일본은 소형챔버를 이용하여 3가지 종류의 비닐 벽지와 2가지 종류의 석고보드를 대상으로 시간의 경과에 따른 VOCs의 방출량을 측정하였다. 소형챔버에 공급되는 공기는 외부공기를 사용하였으며, 측정지점은 챔버를 중심으로 전·후에서 고체흡착법을 이용하여 각각 측정하였고 대상자재에 대해 온도와 습도를 고려하여 VOCs 방출량을 측정하였다. 측정된 VOCs는 실내공기에서 전형적으로 검출되는 Dichlorobenzene, Cyclohexanone, Dodecane, Teradecane, Tetradecanoic 등이 검출되었다. 실험결과에 따르면 휘발성이 적은 물질보다는 휘발성이 강하고 분자량이 적은 물질들이 건축자재로부터 빨리 방출되는 것으로 조사되고 있다. 일정한 습도에서 온도변화에 따른 VOCs 방출량은 온도가 낮을 때 보다 높을 때 많이 방출되었다. 온도조건은 각각 20℃, 30℃, 40℃였으며, 2시간 경과 후 농도차이는 40℃의 경우($9000\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 20℃($1000\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 약 9배정도 높았다. 시간에 따른 농도의 변화는 대략 2~4시간 경과 후 VOCs 방출량이 최대였으며, 시간의 경과에 따라 점차 감소하는 것을 볼 수 있었다. 일정한 온도에서 습도의 변화에 따른 VOCs 방출량은 온도 조건에서와 마찬가지로 습도가 높을수록 방출되는 VOCs의 농도가 높게 측정되었다. 습도조건은 50%, 60%, 70%이며, 2시간 경과 후 농도차이는 70%의 경우($8000\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 50%($2000\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 약 4배정도 높은 것으로 보고 되고 있다.²³⁾

22) Chang, John C.S. 외, Substrate Effects on VOC Emissions from a Latex Paint, Indoor air, v.7 no.4, pp.241-247, 1997

23) Tamura, H. 외, Evaluation of VOC Emissions from Clean room Materials Using New Chamber Test Methods, Institute of Environmental Sciences and Technology, pp.385-390, 1998

제 2 장 실내공기오염물질 이론 고찰

2.1 실내공기오염물질의 종류

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 실내 유입 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. 본 연구에서는 다양한 실내공기오염 물질 중 인체에 미치는 영향이 다른 물질에 비해 비교적 크고, 현재 관심의 대상이 되고 있는 폼알데하이드와 VOCs를 중심으로 고찰하였다.

2.1.1 폼알데하이드 (HCHO)

폼알데하이드는 알데하이드류 중에서 분자량이 작고 (CH_2O , 분자량 = 30) 끓는점이 -19°C 이며, 자극성 냄새(냄새역치 : 0.8ppm)를 갖는 가연성 무색 기체이다. 인화점이 낮아 폭발의 위험성이 있으며, 살균 방부제로 이용되고 물에 잘 녹아 40% 수용액을 포르말린이라고 한다. 폼알데하이드는 화학적으로 반응성이 큰 환원제로 많은 물질과 결합하여 쉽게 중합체를 형성하기 때문에 젤라틴, 아교 등

과 같은 단백질과 결합하여 응고시킨다. 또한, 살균제나 방부제로 사용되고 피혁 제조나 사진 건판, 폭약 등의 제조에 이용되며, 베클라이트와 같은 석탄계, 요소계, 멜라민계 합성수지 제조 등 공업용으로도 널리 사용된다.

폼알데하이드의 배출원으로는 자연발생과 인공발생으로 나눌 수 있다. 폼알데하이드의 자연발생은 대기 중의 탄화수소가 산화되어 생성되는 것으로 죽은 수목이 분해되거나 관엽식물에서 방출되는 화학물질의 변환으로 생성된다. 인공발생은 포르말린, 합판, 합성수지, 화학제품 등의 제조공장, 소각로, 유류, 천연가스 등의 연소시설 등에서 발생된 대부분이 공기비를 산출할 수 없는 개방된 공장에서 발생되며, 촉매 변환기가 없는 자동차의 배기가스에 의해서도 방출된다. 대기 중에서의 농도는 10~100ppb 정도로 존재하는데 비메탄계 탄화수소로 메탄의 대기 중에서 산화와 소각에 의해 발생되기도 한다. 폼알데하이드는 광화학 스모그 형성의 중요한 인자로 작용한다는 점에서 중요하게 다루어지고 있다.

실내 발생원으로는 주로 일반주택 및 공공건물에 많이 사용되는 우레아수지폼 단열재(Urea Formaldehyde Foam Insulation : UFFI)나 섬유옷감, 실내가구의 칠, 난방연료의 연소과정, 흡연, 생활용품, 의약품, 접착제 등을 들 수 있다. 따라서, 실내에서의 폼알데하이드 농도는 신축공동주택에서 높게 나타내며, 조리, 벽난로, 기타 난로(heater) 등에서도 방출된다. 건축자재에서 발생된 폼알데하이드는 건축자재의 수명, 실내온도 및 습도에 따라 건축물의 수명, 실내 환기율에 따라 그 방출량이 영향을 받는다.

1981년 Schenke 등의 보고서에 따르면 우레아폼을 단열재로 사용한 주택에 살고 있는 주민을 조사한 결과, 오랫동안 폼알데하이드에 폭로되었을 경우 정서적 불안정, 기억력 상실, 정신집중의 곤란 등을 유발하고 동물실험에서 폐수종, 비염의 증상이 있는 것으로 나타났다.

폼알데하이드와 같은 알데하이드류와 케톤 등의 카르보닐화합물은 보건학적인 측면에서 노출시 눈과 피부에 영향을 주며 발암성, 독성물질로 알려져 있다. 폼알데하이드에 반복하여 노출될 경우 눈, 코 및 호흡기도에 만성 자극을 일으키며 눈꺼풀에 염증을 유발시키는 것으로 알려지고 있다. 폼알데하이드의 인체에 미치는 영향은 독성 정도에 따라 흡입, 흡수, 피부를 통한 경로로 침투되고, 이 중에서 흡입에 의한 독성이 가장 강하게 나타나는 것으로 알려져 있다. 폼알데하이드는 그 농도가 1ppm 또는 그 이하에서 눈, 코, 목의 자극 증상을 보이며, 동물 실험에서 발암성(비암)이 있는 것으로 나타났다. <표 2.1>은 폼알데하이드가 인체에 미치는 영향을 보여주고 있으며, <표 2.2>는 폼알데하이드 실내방출원을 나

타내고 있다. 건축자재로부터의 폼알데하이드 방출율은 <표 2.3>²⁴⁾에 나타내었다.

<표 2.1> 폼알데하이드의 인체 위해성

농도(ppm)	인 체 영 향
0.05~1.5	신경정신적 영향
0.05~1.0	냄새를 맡을 수 있음
0.01~2.0	눈 자극
0.1~25	상부기도 자극
5~30	상부기도와 폐에 영향
50~100	폐기종, 폐렴, 염증
100 이상	사망

<표 2.2> 폼알데하이드의 실내 방출원

구 분	방출원
제지제품	식료품 가방, 기름종이, 고급화장지, 일회용 위생제품
주름방지제 방수가공제	바닥덮개(융단, 리놀륨, 바니시, 플라스틱제품), 카펫, 접착식 바인더, 화재 지연재 프레스 가공 의복
단열재	우레아-폼알데하이드 발포단열재
연소기구	천연가스, 등유, 담배
압축 목재제품	합판, 칩보드, 장식판넬벽
기타	화장품, 샴푸, 섬유염료, 잉크, 살균제

<표 2.3> 바닥, 벽체 재료 등으로부터의 폼알데하이드 방출율

재 료	방출율(mg/m ² h)
칩보드	0.46~1.69
합판	0.17~0.51
플라스터보드	0.00~0.13
벽지	0.00~0.28
카펫, 커텐	0.00~0.10

24) Awbi H.B., Ventilation of Building, First Edition, London : E&FN SPON, p.37, 1991

2.1.2 휘발성유기화합물 (VOCs)

VOCs는 수많은 유기화합물의 총칭으로 발생원이 매우 다양하며 각 나라마다 VOCs에 대해 조금씩 다르게 정의하고 있다. VOCs는 상온, 상압에서 액체상이나 고체상으로 존재할 수 있지만, 대기 중에서 가스상으로 존재하는 모든 유기화합물질로 정의할 수 있으며, 20℃에서 760torr(101.3Kpa)보다는 작고 1torr(0.13Kpa)보다 큰 증기압을 가지는 모든 유기화합물질이라고 할 수 있다. 또한, 탄화수소류 중 레이드 증기압(Reid Vapor Pressure : RVP)이 10.3 Kpa(1.5 psia) 이상인 석유화학제품, 유기용제 또는 기타 물질로 정의되고 있다.

미국의 EPA에 의하면 VOCs는 CO, CO₂, Carbonic acid, 금속성 탄산염 및 탄산 암모늄을 제외한 탄소화합물로서, 대기 중에서 태양광선에 의해 NO_x와 광화학적 산화반응을 일으켜 지표면의 오존농도를 증가시켜 스모그현상을 일으키는 유기화합물질로 Benzene, Toluene, Propane, Butane, Hexane 등 광화학 반응성이 Ethane 보다 큰 318종의 물질과 이들 물질이 포함된 진증기압(True Vapor Pressure : TVP)이 1.5psia 이상인 석유화학제품 및 유기용제 등을 말하며, Methane, Ethane, 메틸클로라이드, 메틸클로르포름, 클로르플로르탄소류 및 퍼플로르탄소류 등과 같이 광화학반응성이 낮은 화합물은 제외하고 있다.

유럽은 레이드 증기압이 27.6kPa(4.01 psia) 이상 되는 석유류 제품(첨가제 유무에 무관)중 액화석유가스를 제외한 물질들로 산업체에서 많이 사용되고 있는 용매와 화학 및 제약공장, 플라스틱의 건조공정에서 배출되는 유기가스 등으로 저비점 액체연료, 파라핀, 올레핀, 방향족화합물과 같이 우리 생활주변에서 흔하게 사용되는 탄화수소류들을 말한다. 또한, 방향족 탄화수소나 할로젠화 탄화수소 등 인체에 유해한 영향을 주는 독성학적인 측면과 olefin계 탄화수소는 광화학 반응을 일으키는 전구물질로서 중요성을 갖고 있으며, 성층권의 오존층 파괴와 지구온난화에 영향을 미치는 물질로 설명하고 있다.

일본은 탄소화합물중 CO, CO₂, Carbonic acid 등 염류를 제외한 유기화합물질(단, 메탄은 제외)로 원유, 가솔린, 나프타 및 항공터빈연료유 4호(JP-4)의 원유 등 석유제품을 말하며, 이외의 물질로는 단일물질은 비점이 1기압에서 섭씨 150℃ 이하인 물질과 혼합물질은 1기압에서 5%, 유출점이 섭씨 150℃ 이하인 물질을 말한다. CO, CO₂, Carbonic acid 및 그 염류, 메탄, 에탄, 트리클로로에탄 및 트리클로르트리플로르에탄 등 광화학반응성이 없는 물질은 제외하고 있다.

VOCs는 물질의 존재 상(Phase)의 형태에 따라서, 휘발성(Volatile), 반휘발성

(Semi-Volatile), 비휘발성(Non-Volatile)으로 구분하며 증기압이 10⁻² KPa 이상을 VOCs, 10⁻²~10⁻⁸KPa을 SVOCs, 10⁻⁸KPa 이하를 NVOCs로 분류한다. 또한, WHO는 비등점에 의해 고휘발성(Very Volatile), 휘발성(Volatile), 반휘발성(Semi-Volatile), 고형상태(POM)로 구분하며, 비등점이 0℃~(50℃-100℃)의 경우 VVOCs, (50-100℃)~(240-260℃)를 VOCs, (240-260℃)~(380-400℃)를 SVOCs, 380℃ 이상을 POM(Particle-bound Organic Compounds)으로 분류하고 있다. <표 2.4>에는 EPA Method TO-14에서 규정한 40여종의 독성 VOCs들을 나열하였다.

VOCs의 발생은 주유소, 저유시설, 산업체, 매립지, 하수정화시설 등에서의 인위적인 배출과 자연적으로 습지 등 혐기성 조건하에서 박테리아의 분해를 통해서 메탄이 생성되어 배출된다. 실내에서의 VOCs 발생원으로는 건축자재와 마감구성재료, 건물의 유지관리용품(청소용, 각종 세척제 등), 소모성 재료(복사기의 토너), 연소과정의 물질, 재실자의 활동, 외부공기 등으로 구분할 수 있다.

실내에서 VOCs의 농도가 증가하는 주요 원인을 건축자재와 시공의 측면에서 보았을 때, 복합화학물질들을 이용한 새로운 건축자재의 보급과 시공과정에서 노무비의 절감과 숙련공의 부족으로 인한 공법의 변화로 많은 양의 접착제 사용이 들 수 있다. 대부분의 건축자재는 시공 후 초기단계에 다량의 오염물질을 방출하게 되며, 시간의 경과에 따라 방출량이 점차로 감소된다.

연소과정에서의 방출은 실내에서 연소기구를 사용하는 경우나 담배의 흡연도 실내공기오염의 주된 요인이 된다. 또한, 가스나 등유를 사용하는 연소기구, 난로와 같은 개별 난방기구에 연통이나 배기구가 설치되어 있지 않은 경우에 연소가스와 함께 각종 오염물질을 직접 실내로 방출하게 된다.

인체로부터 방출되는 VOCs 물질은 Alcohol, Aldehyde, Ketone, Toluene, Phenol 등 12종류 이상이 포함되어 있으며, 그 중에서 Methane(74mg/인·일)과 Acetone(51mg/인·일)이 가장 많이 방출되고 있다. 또한, 화장품, 향수 등의 사용도 실내 VOCs의 발생원으로 작용하고 있다. 실내에서 발생하는 VOCs와 발생원은 <표 2.5>와 같으며, 주요 건축자재에서 발생하는 VOCs는 <표 2.6>과 같다. <표 2.7>²⁵⁾에 건축자재로부터의 VOCs 방출율을 정리하였다.

25) Godish T., Indoor Air Pollution Control, Third printing, Michigan : Lewis Publishers, p.47, 1991

<표 2.4> 미국환경청 TO-14A에서 규정된 독성 VOCs

	Compounds (synonym)	Formular
1	Freon 12 (Dichlorodifluoromethane)	Cl_2CF_2
2	Methyl chloride (Chloromethane)	CH_3Cl
3	Freon 114 (1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoroethane)	$\text{ClCF}_2\text{CCLF}_2$
4	Vinyl chloride (chloroethylene)	$\text{CH}_2=\text{CHCl}$
5	Methyl bromide (bromoethane)	CH_3Br
6	Ethyl chloride (chloroethane)	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Cl}$
7	Freon 11 (trichlorofluoromethane)	CCl_3F
8	Vinylidene chloride (1,1-dichloroethane)	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$
9	Dichloromethane (methylene chloride)	CH_2Cl_2
10	Freon 113 (1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoroethane)	$\text{CF}_2\text{ClCCl}_2\text{F}$
11	1,1-Dichloroethane (ethylidene chloride)	CH_3CHCl_2
12	cis-1,2-Dichloroethylene	$\text{CHCl}=\text{CHCl}$
13	Chloroform (Trichloromethane)	CHCl_3
14	1,2-Dichloroethane (ethylene dichloride)	$\text{ClCH}_2\text{CH}_2\text{Cl}$
15	Methyl chloroform (1,1,1-trichloroethane)	CH_3CCl_3
16	Benzene	C_6H_6
17	Carbon tetrachloride (tetrachloromethane)	CCl_4
18	1,2-Dichloropropane (propylene dichloride)	$\text{CH}_3\text{CHClCH}_2\text{Cl}$
19	Trichloroethylene (Trichloroethene)	$\text{ClCH}=\text{CCl}_2$
20	cis-1,3-Dichloropropene (cis-1,3-dichloropropylene)	$\text{CH}_3\text{CCl}=\text{CHCl}$
21	trans-1,3-Dichloropropene (trans-1,3-dichloropropylene)	$\text{ClCH}_2\text{CH}=\text{CHCl}$
22	1,1,2-Trichloroethane (vinyl trichloride)	$\text{CH}_2\text{ClCHCl}_2$
23	Toluene	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$
24	1,2-Dibromoethane (ethylene dibromide)	$\text{BrCH}_2\text{CH}_2\text{Br}$
25	Tetrachloroethylene (Perchloroethylene)	$\text{Cl}_2\text{C}=\text{CCl}_2$
26	ChloroBenzene	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$
27	Ethyl Benzene	$\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_5$
28	m-Xylene	$1,3-(\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_4$
29	p-Xylene	$1,4-(\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_4$
30	Styrene (vinyl Benzene)	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}=\text{CH}_2$
31	1,1,2,2-Tetrachloroethane	$\text{CHCl}_2\text{CHCl}_2$
32	o-Xylene	$1,2(\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_4$
33	1,3,5-TrimethylBenzene (mesitylene)	$1,3,5-(\text{CH}_3)_3\text{C}_6\text{H}_6$
34	1,2,4-TrimethylBenzene	$1,2,4-(\text{CH}_3)_3\text{C}_6\text{H}_6$
35	m-Dichlorobezne (1,3-Dichlorobenzene)	$1,3-\text{Cl}_2\text{C}_6\text{H}_4$
36	Benzyl chloride	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{Cl}$
37	o-DichlroBenzene (1,2-Dichlorobenzene)	$1,2-\text{Cl}_2-\text{C}_6\text{H}_4$
38	p-DichlroBenzene (1,4-Dichlorobenzene)	$1,4-\text{Cl}_2-\text{C}_6\text{H}_4$
39	1,2,4-Trichlorobezne	1,2,4-trichlroBenzene
40	1,1,2,3,4,4-Hexachloro-1,3-butadiene	C_4Cl_6

<표 2.5> 실내에서 발생하는 VOCs 물질과 발생원

VOCs 물질	주요 발생원
Benzene	연기, 세척 청소용품, 페인트 제거제, 접착제, 파티클 보드
Dichlorobenzene	방향제, 증약
Pentachlorobenzene	목재보존제, 곰팡이제거제, 제충제
Butylacetate	락커
Toluene, Xylene	페인트, 바닥용 왁스, 니스, 염료착제, 등유용 난방기구, 벽지, 코킹 및 실런트 제품
Stylene	담배연기, 코킹제, 발포형 단열재, 섬유형 보오드

<표 2.6> 건축자재 및 제품에서 방출되는 VOCs

재료/제품	방출되는 주요 VOCs
라텍스 코킹제	Methylethylketone, Butanol, Benzene, Toluene
바닥접착제	Decane, Undecane, Xylene
칩보드	HCHO, Acetone, Benzaldehyde, Benzene
Moth crystals	p-Dichlorobenzene
Floor wax	Decane, Undecane, Dimetyloctane, Etylmetalbenzene
목재 착색제	Decane, Metyloctane, Dimetylnonane, Trimetalbenzene
라텍스 페인트	Butanol, Etylbenzene, Propylbenzene, Toluene
가구 광택제	Dimetylhexane, Trimetylhexane, Trimetylheptane, Etylbenzene
폴리우레탄 바닥마감	Decane, Undecane, Butanol, Etylbenzene, Xylene
공기청정제	Decane, Undecane, Etylheptane 치환된 방향족

<표 2.7> 건축자재료로부터의 VOCs 방출율

재 료	방출율(mg/m ² h)
벽지	비닐과 종이
	비닐과 유리섬유
	인쇄된 종이
벽 마감구성재	PVC
	직물
바닥 마감구성재	리놀륨
	합성섬유
	고무
	연성 플라스틱
	균질 PVC
도료	아크릴 라텍스
	바니시(순수 에폭시 수지)
	바니시(폴리우레탄, 2-component)
	바니시(내산성)

VOCs는 유지류를 녹이고 휘발성이 커서 공기 중에 증기로 존재하며 스며드는 성질이 있으므로 피부에 흡수되기 쉽고, 호흡기로 흡입되면 중추신경을 침범하는 등 실내에서 저농도 장기노출시 발암물질로 알려져 있다²⁶⁾.

VOCs 물질이 인체에 미치는 영향은 주로 호흡기관의 자극과 두통의 원인이 되고, 신경·생리학적 기능장애 등을 유발하는 것으로 알려지고 있다. 인체에의 직접적인 영향이 나타나는 농도나 오염물질에 대한 인체의 반응 정도는 개인에 따라 큰 차이를 보인다. 대부분의 VOCs는 마취작용을 갖고 있는데, 이것은 신경계의 지방조직에 대한 친화성 때문이다. 일반적으로 한꺼번에 대량을 흡입하면 마취작용을 나타내며, 마취되지 않을 정도의 작은 양을 오랜 시간동안 반복하여 흡입하게 되면 만성중독을 일으킨다.

VOCs에 대한 민감성은 다른 유독물질에서와 마찬가지로 개인차가 있다. VOCs 중 Benzene, Toluene, Xylene, Cyclohexane 등의 방향족탄화수소는 비록 낮은 농도라 하더라도 상대적으로 독성이 크며, Toluene, Xylene, Etylbenzene의 순으로 독성이 강하다. 순수한 Toluene은 공기 중에 600ppm 인 곳에서 8시간 폭로되면 눈, 코, 인후, 피부 등에 발생하는 자극 증상과 중추신경계 억제작용으로 피로, 졸음, 두통, 어지러움, 우울증 등의 신경증상이 나타난다고 알려져 있다. 또한, 저농도의 Benzene에 장기간 폭로되어 만성 중독을 일으키는 경우에는 빈혈, 혈액응고장애 그리고 백혈구를 파괴하여 감염에 대한 저항력이 떨어지고 발암성 물질로 보고되고 있다.²⁷⁾ Benzene은 호흡을 통해 약 50%가 인체에 흡수되며, 아주 작은 양이지만 피부를 통해 침투되기도 한다. 체내에 흡수된 Benzene은 주로 지방조직에 분포하게 되며, 급성중독일 경우 마취증상이 강하게 나타나며 호흡곤란, 불규칙한 맥박, 졸림 등을 초래하여 혼수상태에 빠진다. 만성중독일 경우 혈액장애, 간장장애, 재생불량성 빈혈, 백혈병을 일으키기도 한다. Toluene 또한, 호흡에 의해 주로 흡입되고 피부, 눈, 목안 등을 자극하며 피부와 접촉하면 탈지작용을 일으키기도 한다. 또한, 두통, 현기증, 피로 등을 일으키며 고농도에 노출될 경우 마비상태에 빠지고 의식을 상실하며 때로는 사망에 이르기도 한다. Xylene에 의해서는 성장장애, 태아독성영향, 임신독성 등의 영향을 받는다.

<표 2.8>은 주요 VOCs에 대한 주요 노출 경로와 독성 확인, 그리고 EPA의

26) 이상형, 기존 공동주택의 실내공기환경에 관한 연구, 중앙대학교 석사학위논문, p.9, 1995

27) 이윤규 외, 기존 공동주택의 실내공기질 실태에 관한 측정연구, 대한건축학회논문집 20권 11호, p 328, 2004

발암성 등급에 대하여 정리한 것이다.

<표 2.8> 주요 VOCs에 대한 주요 노출 경로와 독성

대상 물질	주요 노출 경로	주요 독성	발암성	EPA 분류
Benzene	호흡, 섭취, 피부접촉	대사독성 유발 백혈구 감소증에 의한 뼈 및 골수 조직의 위축 적혈구, 백혈구, 혈소판의 감소, 재생 불량성 빈혈 유발	고노출 근로자들에 대한 백혈병 유발 및 임파암과 혈액 암의 발생을 증가	A (human carcinogen)
Toluene	호흡, 섭취, 피부접촉	고농도 노출시 중추신경계 이상 가능, 간독성과 신장독성	-	D (not classifiable as to human carcinogen)
Xylene	호흡, 섭취, 피부접촉	고농도 노출시 중추 신경계 영향을 보이며, 지속적인 노출시 신경행동학적 기능 저하 유발	-	D (not classifiable as to human carcinogen)
Styrene	호흡, 섭취, 피부접촉	지방 세포에 축적 성이 있으며, 고농도의 직업적 노출 (25ppm 이상)로 인해 점막자극, 간 독성, 폐기능 장애, 중추신경장애 유발	고노출 근로자에게서 백혈병 및 임파암 발생 증가가 관찰되었으나, 혼란변수의 영향으로 명확한 결과를 제시할 수 없었음	D (not classifiable as to human carcinogen)

유럽의 공동연구위원회는 <표 2.9>와 같이 TVOC에 대한 위해성 평가를 통하여 기준농도를 설정하였다.

<표 2.9> TVOC 농도와 건강에의 영향

분 류	TVOC [mg/m ³]
영향이 없음	< 0.3
건강영향 발생 가능	0.3 ~ 3.0
건강영향 발생	3.0 ~ 25
독성 범위	> 25

실내의 총 휘발성 유기화합물질인 TVOC의 농도는 1~2 ppm 이하의 매우 낮은 상태에서도 인체의 건강에 영향을 미치게 된다. 농도가 매우 낮기 때문에 쉽게 검출되지 않을 뿐만 아니라 인체에의 자극과 증상이 매우 경미하고 서서히 나타나는 것이 특징이다.

WHO는 WHO와 유럽연합(EU)이 공동으로 작성한 “공기질의 가이드라인”을 기초로 1997년 Expert Task Force회의에서 공기질의 가이드라인(Guideline For Air Quality)을 작성하였다. 이 중에서 주요한 실내공기오염물질과 발생원을 정하였으며, 오염물질의 발생원을 실외, 실내·실외, 실내의 3분류로 구분하였다. <표 2.10>은 WHO와 EU가 정한 주요 오염물질이다.

<표 2.10> WHO와 EU에서 정한 주요 실내공기오염물질과 발생원

구분	주요 오염물질	발 생 원
실 외	SO ₂ , SPM/RSP	연료의 연소, 용광로
	O ₃	광화학반응
	화분(꽃가루)	나무, 풀, 잡초, 식물
	Pb, Mn	자동차
	Pb, Cd	공업배출
	VOCs, PAH	석유화학제품, 불완전연소의 연료에서의 증발작용
실내외	NO _x , CO	연료의 연소
	CO ₂	연료의 연소, 대사작용
	수증기	생물적 활동, 연소, 증발
	VOCs	휘발작용, 연료의 연소, 도료, 대사작용, 살충제, 방향제
	포자	균류
실 내	Rn	나무, 건축자재, 물
	HCHO	절연재료, 가구, 담배연기
	석면	난연성 물질, 절연재료
	NH ₃	대사작용
	PAH, As	담배연기
	VOCs	접착제, 용제, 요리, 화장품
	먼지	방향제, 도료, 수은 함유제품에서 방출
	알레르기	애완용 동물의 털, 진드기
	미생물	전염병

2.2 실내공기오염물질 관련 국내외 관련기준

2.2.1 국내외 실내공기질 관련 기준

1) 외국의 실내공기질 관리현황 및 기준치

선진국의 실내공기질 기준과 실내공기질 정책은 1980년대 이후 새로운 환경정책분야로 대두하여 미국, 유럽 및 일본 등을 중심으로 관련 법령 및 정책을 수립하여 추진하고 있다. 공기질 기준은 일반적으로 대기, 일반 실내환경, 작업환경으로 구분하여 설정하는 경향이 있는데, 그 이유는 각각의 환경적 특성에 따라 오염물질의 발생특성과 재질자에 미치는 영향 정도가 다르기 때문이다. 그러나 오염물질 기준에 대한 국제적으로 단일화된 기준은 없으며, 각 나라별로 기준이 다소 차이가 있으나 오염물질별로 큰 차이는 없다. 또한, 국제적으로 측정방법 및 분석방법에 대한 일정한 기준이 없어 각종 측정사례를 비교하여 볼 때, 연구마다 측정방법이 상이하고 분석방법이 달라 측정된 결과 및 기준을 각 나라별로 절대 비교하는 데는 한계가 있다. 그러나 현재 EPA, ISO 등에서 통일된 측정법을 정하여 기준이 통일되고 있는 추세에 있다.

① 미국

미국은 실내공간에 대한 법적규제를 하고 있지 않으나, 작업환경의 실내공기오염물질 가이드라인을 제시하고 있다.

EPA는 OAR(Office of Air and Radiation)산하의 IED(Indoor Environments Division)에서 국가적인 공기질 관련 정책 및 프로그램을 개발하고, ‘실내공기질 위원회(CIAQ : Committee for Indoor Air Quality)’의 활동을 주도하여 실질적인 업무 담당하고 있다. 또한, CIAQ는 실내공기오염물질 중 중요한 오염물질 7가지에 대해 그룹별로 구분하여 연구하고 있다.

산업안전보건국(OSHA : Occupation Safety and Health Administration)과 미국산업위생사협회(ACGIH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists)에서 작업환경조건의 공기질 기준을 제시하였다.

이외에 실내공기오염물질에 대한 지침이나 권고이외에도 실내공기질 개선효과를 유도할 수 있는 방법으로 인증제도 실시하고 있으며, 이 중의 하나로 건물전체의 관점에서 에너지와 친환경성을 평가하고 건축시장을 활성화시키기 위해 민간자율로 시행하고 있는 환경성능평가제도인 LEED(Leadership in Energy

Environmental Design)를 시행하고 있다.

민간단체인 ASHRAE(American Society Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers)에서 <표 2.11>의 주거용 건축물에 관한 실내공기질 가이드라인(안)(62.2 Draft, 2000.8.11)을 제시하였다.

<표 2.11> 미국 ASHRAE 가이드라인(안)

오염물질	목표 가이드라인
CO	9ppm(8시간 평균)
HCHO	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.1ppm)(30분 평균)
Pb	1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3개월 평균)
NO ₂	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1년간 평균)
냄새	거주자나 방문자의 80%이상이 허용 가능하다고 예측
O ₃	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (50ppb)(8시간 평균)
PM10	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1년 평균)
Rn	2pCi/Liter(1년 평균)
SO ₂	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1년간 평균)
TVOC	1) 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만 2) 300~3,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만 3) 3,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상

② 캐나다

캐나다는 작업장 및 주거지의 실내공기질 관리지침에 따라 관리하고 있으며, 보건부에서 임상실험, 동물실험 연구결과에 기초하여 (권장)기준치를 설정(1987년 제정, 1989년 개정)하였다. 또한, 실내공기오염물질을 발암물질과 비발암물질로 구분 관리하고 있으며, 생물학적인 오염원과 기타 먼지, 담배연기 등을 포함한 권고기준을 설정하였다. 또한, 신축 및 기존사무실 건물의 실내공기질 인증제도 “BEPAC(Building Environmental Performance Assessment Criteria System)을 시행하고 있다. 캐나다의 주거공간의 실내공기질에 대한 노출 가이드라인(권장)은 <표 2.12>와 같다.

<표 2.12> 캐나다의 주거공간의 실내공기질에 대한 노출 가이드라인(권장)

오염물질	목표 가이드라인
HCHO	60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 (Target Level) 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 (Action Level)
CO ₂	3,500ppm 이하
CO	1시간 평균 25ppm 이하 8시간 평균 11ppm 이하
NO ₂	1시간 평균 0.25ppm 이하
O ₃	1시간 평균 0.15ppm 이하
PM2.5	1시간 평균 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
SO ₂	5분 평균 0.38ppm 이하
Rn	연평균 800Bq/m ³ (21.6 pCi/L)
습도	여름철 30~80% 겨울철 30~55%

③ 유럽

유럽은 실내공기질에 영향을 미치는 실내오염원의 제어를 위하여 건축자재와 설비기준 관리하고, 건물내부에서 발생하는 각종 오염물질의 방출특성에 대한 정보를 건축가나 전문 관리자에게 제공하고 있다. 노르웨이, 핀란드 등을 중심으로 WHO에서 1987년에 제정하여 2000년 재검토를 통해 개정한 <표 2.13>의 “Air Quality Guideline for Europe²⁸⁾”에 근거하여 각 나라별 실정에 맞는 기준을 설정하고 있다.

28) Air Quality Guideline for Europe 2nd Edition, WHO, 2001

<표 2.13> WHO 가이드라인

항 목	가이드라인($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	평균 노출시간
Cd	0.005	연간
CS ₂	100	24시간
CO	100,000 60,000 30,000 10,000(10ppm)	15분 30분 1시간 8시간
황화수소	150	24시간
Pb	0.5	연간
Mn	0.15	연간
Mercury	1	연간
NO ₂	200 40	1시간 연간
O ₃	120	8시간
SO ₂	500 125 50	10분 24시간 연간
HCHO	100	30분
Toluene	260	1주일
Benzene	6*10 ⁻⁶	UR/lifetime
Stylene	260	1주일
Trichloroethylene	4.3*10 ⁻⁷	UR/lifetime
1,2-Dichloroethane	700	24시간
1,4-Dichloromethane	3,000 450	24시간 1주일
Tetrachloroethylene	250	연간
바나듐(V)	1	24시간
Rn	2.7PCi/L, 100Bq/m ³	연간

유럽 국가 중의 하나인 덴마크는 환경보호청(EPA)에서 실내공기의 오염관리를 담당하고 있다. 실내공기질에 영향을 미치는 실내오염원의 제어를 위하여 건축자재와 설비기준을 강화하고 있으며, VOCs, PAHs, 라돈, 폼알데하이드, 석면과 같은 실내 배출원을 엄격히 통제하고 있다. 또한, 실내환경협회는 건물재료와 인테리어 재료들이 실내환경에 영향을 미친다는 점을 중시하여 실내환경인증을 실시하고 있다.

독일은 연방정부 차원에서 환경, 보건, 경제, 건설, 노동부 등 관계부처가 참여하는 IAQ 연구위원회 운영하여, 건물에서 라돈의 권고치를 250Bq/m³(6.8pCi/L),

폼알데하이드는 0.1ppm, 테트라클로로에틸렌은 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정·관리하고 있다.

노르웨이는 보건부, 노동부, 건축물 관련부처 등이 실내공기질 관련업무 수행하고 있다. 이 중 보건부 산하 국립공중위생원(National Institute of Public Health)에서 <표 2.14>의 라돈 석면 등에 대한 실내공기질 가이드라인 마련하였고, 이 가이드라인을 근거로 실내공기질개선요청 및 건물폐쇄 등이 가능하도록 하고 있다.

<표 2.14> 노르웨이 국립공중위생원의 실내공기질 가이드라인

항 목	기 준
라 돈	$200\text{Bq}/\text{m}^3$ 이하
석 면	$0.001 \text{ fiber}/\text{m}\ell$ 이하
광물섬유(MMMF)	$0.01 \text{ fiber}/\text{m}\ell$ 이하
PM2.5	$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24시간) 이하

핀란드의 환경부는 <표 2.15>의 폼알데하이드, PM10 등에 대한 실내공기질 권장치 제정하여 시행하고 있다. 건축자재로 인한 실내공기의 오염방지를 위해 냄새를 유발하거나 유해한 VOCs의 방출율에 관한 정보를 건축가나 건물관리자에게 제공하고, 건물내부의 공기의 흐름을 고려한 오염물질 농도분포 예측과 건물의 실내표면에 오염물질이 흡착된 후 방출되는 과정까지 고려한 모델링 프로그램을 개발하여 활용하고 있다.

<표 2.15> 핀란드 환경부의 실내공기질 권장치

항 목	기 준
암모니아, 아민	$20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
석면	$0 \text{ fiber}/\text{m}^3$ 이하
HCHO	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
CO	$8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
PM10	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
Rn	$200 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 이하
Stylene	$1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하

또한, 핀란드 실내공기질협회(FiSIAQ)는 2000년에 <표 2.16>의 실내공기질 인

증제도 등급기준 제정하여 실시하고 있다. 실내공기 중의 오염정도를 나타내는 실내공기질과 쾌적한 정도를 나타내는 온·습도 등 환경조건을 모두 포함하여 평가한다.

<표 2.16> 핀란드 FiSIAQ의 실내공기질 인증제도 등급기준

항 목	단 위	등급기준		
		S1	S2	S3
Rn	Bq/m ³	100	100	200
CO ₂	ppm	700	900	1200
암모니아, 아민(NH ₃)	μg/m ³	30	30	40
HCHO	μg/m ³	30	50	100
TVOC	μg/m ³	200	300	600
CO	μg/m ³	2	3	8
O ₃	μg/m ³	20	50	80
냄새		3	4	5.5
PM10	μg/m ³	20	40	50

폴란드는 1990년대 중반부터 실내공기질 개선 조치를 위해 <표 2.17>의 실내 공기질 기준을 마련하여 시행하고 있다.

<표 2.17> 폴란드의 실내공기질 기준

구분	1일 8~10시간 노출기준(mg/m ³)
Benzene	20
Butanol	300
Phenol	50
Xylene	150
O ₃	150
벤타클로로페놀(PCP)	10
Mercury	3
Toluene	250

스웨덴, 노르웨이, 핀란드, 덴마크의 연합체로 구성된 HVAC, 에너지, 건축환경, 의학 등을 전문으로 하는 학회인 SCANVAC은 VOCs에 의한 실내 공기환경의 규정을 <표 2.18>과 같이 폼알데하이드와 TVOC 농도에 의하여 3단계(AQ₁,

AQ₂, AQ_X)로 구분하여 제시하고 있다.

<표 2.18> SCANVAC의 실내 공기환경 분류

구 분	노출 시간	최대 허용농도(mg/m ³)		
		AQ ₁	AQ ₂	AQ _X
TVOC	0.5 h	0.2	0.5	*
HCHO	0.5 h	0.05	0.1	*

단, * 는 필요에 따라 별도로 정함. (AQ; air quality)

④ 호 주

보건후생성에서 실내공기질 관리 프로그램을 운영하며 실내공기질의 인체영향 및 관리방향에 대한 지침서를 발간하고 있다. 건축물 설계시 실내공기질 관리를 위한 환기규정을 정하였으며 환기기준과 측정방법을 명시하였으며, NHMR (National Health and Medical Research Council)은 <표 2.19>의 실내공기질 가이드라인을 제안하였다.

<표 2.19> 호주 NHMR의 실내공기질 가이드라인

항 목	기 준
Rn	연평균 200Bq/m ³ 이하
부유분진	연평균 90μg/m ³ 이하
HCHO	12ppb 이하
VOCs	1시간 평균 TVOC 500μg/m ³ 이하 1시간 평균 250μg/m ³ 이하
CO	8시간 평균 9ppm 이하
O ₃	240ppb 이하
SO ₂	1시간 평균 700ppb 이하
Pb	3개월 평균 1.5μg/m ³ 이하

⑤ 싱가포르

싱가폴 환경부에서 실내공기질 업무를 관리하고 있으며, 1996년에는 <표 2.20>의 실내공기질관리 가이드라인을 제정하였다. 가이드라인을 설정하여 건물의 소유자는 매 2년마다 실내공기질 정밀심사를 실시하며, 환기시스템은 매 6개월마다 정밀검사 의무 부여하였으며, CO₂, CO, 폼알데하이드 등에 대한 실내공기질 가이드라인을 설정하여 관리하고 있다.

<표 2.20> 싱가포르 환경부의 실내공기질 가이드라인

오염물질	CO ₂	CO	HCHO	O ₃	VOCs	총세균	부유분진
기준	1000ppm	9ppm	0.1ppm	0.05ppm	3ppm	500cfu/m ³	150μg/m ³

※ 온도(22.5~25.5℃), 상대습도(70%), 기류(0.25m/s)

⑥ 일본

일본은 최근 5년간 실내공기질에 대한 연구가 가장 활발하게 이루어지고 있으며, 국가적 차원에서 관련 법령을 제정하고 운영하고 있다. 일본에서 “새집증후군” 문제가 부각됨에 따라 1996년 7월에 후생노동성, 문부과학성 등 관계부처와 전문가, 관련업계 등이 참여하는 ‘건강주택연구회’를 조직하여 범정부적으로 대처하고 있다.

일본의 후생노동성은 주택을 대상으로 <표 2.21>의 폼알데하이드, 톨루엔 등 13가지 화학물질 농도의 권고기준 가이드라인을 97년부터 2002년까지 연차적으로 설정하였다. 가이드라인 중 폼알데하이드와 크로로피리포스는 건축기본법의 규제대상 물질로 지정하였으며, ①~⑥항목은 주택성능표시에서 농도를 측정하는 물질로 지정하였다.

<표 2.21> 일본 후생노동성의 실내공기 중 화학물질농도 가이드라인

오염물질	기 준
①HCHO	100μg/m ³ (0.08ppm)
②Acetaldehyde	48μg/m ³ (0.03ppm)
③Toluene	260μg/m ³ (0.07ppm)
④Xylene	870μg/m ³ (0.20ppm)
⑤Etylbenzene	3,800μg/m ³ (0.88ppm)
⑥Stylene	220μg/m ³ (0.05ppm)
p-Diclorobenezene(p-DCB)	240μg/m ³ (0.04ppm)
테트라데칸	330μg/m ³ (0.04ppm)
클로피리포스	1.0μg/m ³ (0.07ppb) 0.1μg/m ³ (0.007ppb)-소아대상
페놀캡	33μg/m ³ (3.8ppb)
디아지논	0.29μg/m ³ (0.02ppb)
디부틸 푸탈레이트	220μg/m ³ (0.02ppm)
프탈릭 에스테르-2-에틸헥실(DEHP)	120μg/m ³ (7.6ppb)

국토교통성은 2000년 6월에 “주택품질확보촉진법”에 의거하여 주택성능표시제도를 시행하였고, 2004년 7월에는 “건축기준법”에 의해 <표 2.22>와 같이 폼알데하이드 농도에 의한 건축자재 사용면적 제한, 건축물의 환기설비 설치 의무화하였다.

<표 2.22> 일본 국토교통성의 목질계 내장재의 실내공기 관련 항목

항 목	내 용
HCHO	- 목질계 내장재의 방산량에 따른 등급 표시 - 등급 4~등급 1까지 4개 등급으로 분류
실내화학물질농도표시	HCHO, Acetaldehyde, Toluene, Xylene, Etylbenzene, Styrene
환기표시	전체 환기설비 및 국소환기설비 표시

문부과학성은 학교보건법의 학교환경위생기준을 2004년 2월에 <표 2.23>과 같이 개정하여 실내공기질 관리를 강화하였다.

<표 2.23> 일본 문부과학성의 폼알데하이드와 주요 VOCs에 대한 기준

대상 물질	CO ₂	CO	NO ₂	부유 분진	낙하 세균	HCHO	Toluene	Xylene	p-Diclorob enezene	Etylbenz enee	Styrene
기준	1,500 ppm	10 ppm	0.06 ppm	0.10 mg/m ³	10 CFU/m ³	100 μg/m ³	260 μg/m ³	870 μg/m ³	240 μg/m ³	3,800 μg/m ³	220 μg/m ³

2) 국내의 실내공기질 관리현황 및 기준치

선진 각국 등에서 과거 수 십년 동안 실내공기질에 관한 각종 오염물질 파악, 인체영향, 위험성평가(Risk Accessment) 및 관련 법령을 활발히 진행되고 있는데 반하여, 우리나라는 대부분 실외의 대기오염 연구에 집중되어 1980년대 중반까지만 해도 실내공기질(IAQ)은 매우 생소한 용어였다. 1980년대 까지 CO, CO₂, 분진 등의 몇몇 오염물질에 관한 조사가 부분적으로 수행되기 시작하여 건교부와 보건복지부를 중심으로 CO, 탄산가스, 분진에 대한 기준치가 실내환경에 적용되어 사용되어 왔다. ‘90년대 중반이후 부터 라돈가스, NO_x, 폼알데하이드 및

VOCs 등 다양한 오염물질에 대하여 연구를 해오고 있다.

국내의 실내공기질을 관리하는 부처는 환경부, 보건복지부, 노동부, 교육인적자원부, 건설교통부 등 대상 시설에 따라 관계부처별로 나뉘어 있다. 최근 환경부는 다중이용시설등의실내공기질관리법에 의해 다중이용시설(17개 시설군) 및 신축공동주택의 실내공기질 관리하고 있으며, 보건복지부와 건축법 시행규칙에 공기조화를 실시하는 건물의 실내공기 허용기준을 규정하고 있고, 노동부는 작업장 환경 기준을 정하여 관리하고 있다. 대기환경기준은 1978년 정해진 환경보전법에서 규정하고 있다. 그 외에도 교육인적자원부, 건설교통부 등 여러 부처가 개별법에 의해 학교, 공중이용시설 등에 대한 실내공기질을 관리하고 있다. <표 2.24>는 국내 각 부처별 실내공기질 관리현황을 정리한 것이다.

<표 2.24> 국내 각 부처별 실내공기질 관리현황

담당부서 기준물질	환경부	보건복지부	노동부	교육인적 자원부	건설 교통부
적용 대상	다중이용시설 (지하역사, 의료기관, 찜질방 등 17개 시설군)	공중이용시설 (학원, 공연장, 업무시설 등)	사무실, 작업장	학교	주차장 (2000㎡ 이하)
근거법	다중이용시설등의 실내공기질관리법	공중 위생관리법	산업안전보건법 산업보건기준에 관한규칙	학교보건 법	주차장법
측정 항목	10개 항목 ; 미세먼지, CO, CO ₂ NO ₂ HCHO, 총부유세균, Rn, VOCs, 석면, O ₃	3개 항목 (미세먼지, CO, CO ₂)	4개 항목 (미세먼지, CO, CO ₂ ,HCHO)	2개 항목 (미세먼지, CO ₂)	1개 항목 (CO)
관리 방법	다중이용시설 유지기준 준수, 다중이용시설에 환기설비 설치, 신축공동주택 실내공기질 측정-공고	공기정화시설 교체-청소	필요시사무실공기 정화,실외오염물질 의 유입방지 (건물개보수시 공기오염 관리)	연1회 점검 의무 및 적정조치 강구	적정 환기 설비 설치

① 다중이용시설의 실내공기질 관리

최근 환경부는 지하생활공간공기질관리법을 다중이용시설등의실내공기질관리법으로 개정·공포하여 2003년 12월 31일부로 입법 예고하였으며, 적용 대상이 되는 다중이용시설의 범위를 종전 지하역사, 지하도상가의 2개 시설군에서 도서관, 의료기관, 찜질방, 대규모점포 등 15개 시설군을 추가하여 17개 시설군으로 확대하였다. <표 2.25>는 환경부의 실내공기질 관리정책 변천사이며, <표 2.26>은 다중이용시설등의실내공기질관리법의 적용대상시설을 나타낸 것이다.

<표 2.25> 실내공기질 관리정책 연혁

구 분	주 요 내 용	비 고
지하공간 환경기준 권고치	· 지하도상가, 지하주차장 등 다양한 지하공간에 대한 환경기준 권고치를 설정하여 각 시·도내 적정관리 · 아황산가스, 먼지, 납 등 14개 오염물질에 대한 권고치 설정	· 시행:1989.9.18
지하생활공간 공기질관리법	· 다중이 이용하는 지하역사, 지하도상가를 규제대상 * 관계부처 이견으로 통합실내공기질관리법 제정 실패	· 제정:1996.12.30 · 시행:1997.12.31
다중이용시설 등의실내공기 질관리법	· 대상시설 확대(2→17) * 공중위생관리법, 주차장법, 소방법 등의 관리대상시설물 * 교육부 「학교보건법」, 노동부 「산업안전보건법」의 관 - 리대상 시설 제외 · 다중이용시설에 대한 유지기준과 권고기준 설정 · 신축공동주택 측정공고의무 반영 등	· 제정:2003. 5.29 · 시행:2004. 5.30

<표 2.26> 적용대상 다중이용시설

시 설 명	규 모
지하역사	모든 지하역사
지하도상가(지상건물에 딸린 지하층의 시설제외) 여객자동차터미널, 철도역사의 대합실, 실내주차장(기계식 주차장 제외)	연면적 2천㎡이상
공항시설중 터미널	연면적 1천5백㎡이상
항만시설중 터미널	연면적 5천㎡이상
도서관, 박물관, 미술관	연면적 3천㎡이상
의료기관(입원진료병상이 100개 이상)	연면적 2천㎡이상
지하에 위치한 장례식장, 국공립 보육시설, 노인의료 보호 시설중 국공립 노인전문요양시설·유료노인전문 요양시설·노인전문병원	연면적 1천㎡이상
찜질방	연면적 1천㎡이상
산후조리원	연면적 5백㎡이상
대규모점포	모든 대규모점포

② 다중이용시설의 유지기준 및 권고기준 설정

다중이용시설등의실내공기질관리법에 명시된 국내의 실내공기질 기준은 실내 공기질을 항시 유지하여야 하는 오염물질로 미세먼지, CO₂, 폼알데하이드, 총부유세균, CO 등 5개 오염 물질로 정하여 이들 오염물질에 대하여는 <표 2.27>과 같이 유지기준을 설정하였고, 위반시 과태료부과 등 제재 조치가 내려지도록 하였다. 외부에 오염원이 있거나 위험도가 비교적 낮은 NO₂, Rn, TVOC, 석면, O₃ 등 5개 오염물질에 대해서는 <표 2.28>과 같이 기준을 달성할 것을 권고하는 기

준을 설정하여 자율적 준수 유도하고 있다. 또한, 이들 오염물질에 대하여는 연1 회 이상 측정하고 그 결과를 매년 1월 31일까지 시·도지사에게 보고하도록 하였다.

<표 2.27> 다중이용시설의 실내공기질 유지기준

오염물질항목 다중이용시설	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO ₂ (ppm)	HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	총부유세균 (CFU/ m^3)	CO (ppm)
지하역사, 지하도상가, 여객 자동차터미널의 대합실, 철도 역사의 대합실, 공항시설중 여객터미널, 항만시설중 대합실, 도서관, 박물관, 미술관, 장례식장, 찜질방, 대규모점포	150이하	1,000 이하	120이하	-	10이하
의료기관, 보육시설, 노인의료시설, 산후조리원	100이하			800이하	
실내주차장	200이하			-	25이하

<표 2.28> 다중이용시설의 실내공기질 권고기준

오염물질항목 다중이용시설	NO ₂ (ppm)	Rn (pCi/ℓ)	TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	석면 (개/cc)	오존 (ppm)
지하역사, 지하도상가, 여객 자동차터미널의 대합실, 철도 역사의 대합실, 공항시설중 여객터미널, 항만시설중 대합실, 도서관, 박물관, 미술관, 장례식장, 찜질방, 대규모점포	0.05이하	4.0이하	500이하	0.01이하	0.06이하
의료기관, 보육시설, 노인의료시설, 산후조리원			4000이하		
실내주차장	0.30이하		1,000이하		0.08이하

③ 다중이용시설 관리책임자에게 교육의무 부여

다중이용시설의 소유자등은 실내공기질 관리에 관한 교육을 환경부장관이 위탁하는 교육기관에서 받도록 의무화하였다.

④ 다중이용시설에 환기설비 설치의무 부여

다중이용시설을 설치하는 자는 <표 2.29>와 같이 공기정화설비 및 일정 구조·기준의 환기설비를 설치하도록 의무화하고 위반시 개선명령 등을 통해 제재할 수 있도록 하였다.

<표 2.29> 다중이용시설의 환기설비 설치기준

다중이용시설 산정기준	여객자동차터미널의 대합실, 철도역사의 대합실, 공항시설중 여객터미널, 항만시설중 대합실	지하역사, 지하도상가, 도서관, 박물관, 미술관, 장례식장, 찜질방, 대규모점포	의료기관, 보육시설, 노인의료시설, 산후조리원	실내주 차장
환기횟수(회/h)	0.3이상	0.5이상	0.7이상	3이상
이용인원당 환기량(m ³ /인·h)	25이상	25이상	25이상	25이상

⑤ 다중이용시설의 오염물질 다량방출 건축자재 사용제한

폼알데하이드, TVOC 등의 오염물질을 기준이상 방출하는 건축자재를 <표 2.30>과 같이 관계부처와 협의하여 고시하고, 다중이용시설에 사용 금지하도록 하였다.

<표 2.30> 건축자재별 방출기준

구 분 오염물질	접 착 제 (mg/m ² ·h)	일반자재 (mg/m ² ·h)
폼알데하이드	4이상	1.25이상
VOCs	10이상	4이상

⑥ 신축공동주택 실내공기질 관리

다중이용시설등의실내공기질관리법에 따라 시행 후 사업계획 승인이나 건축허가를 신청하는 100세대 이상의 신축공동주택에 대하여는 주민입주 전에 규모에 따라 3개소 내지 9개소에서 폼알데하이드와 TVOC를 측정하여 해당 시장·군수·구청장에 제출하고 주민들이 잘 볼 수 있는 출입문 등에 60일간 공고토록 하였다. 신축공동주택에서의 측정대상 오염물질을 폼알데하이드와 Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene, 1,4-Dichlorobenzene, Styrene의 6가지 VOCs로 규정하고 있다. 그러나 이들 오염물질에 대한 기준은 아직 설정하지 않았다.

<표 2.31>은 국내외 실내공기오염물질 기준 중 폼알데하이드와 VOCs에 관한 기준만을 비교한 것으로 각 나라의 기준은 대체로 유사한 것으로 나타났다.

<표 2.31> 국내외의 폼알데하이드 및 VOCs 기준 비교

구 분	HCHO			TVOC			운영기관
미 국	1ppm (8시간), 2ppm (15분)			-			EPA
캐나다	60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하			-			Health Canada
핀란드	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 (권고기준)			Styrene 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 (권고기준)			환경부 (MDE)
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	FiSIAQ
	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
유 럽	AQ1	AQ2	AQx	AQ1	AQ2	AQx	SCANVAC
	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	*	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	*	
호 주	120 ppb 이하			500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하			NHMRC
일 본	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$			잠정목표 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 VOCs 13종에 대한 가이드라인 제시			후생노동성
홍 콩	최우수		우수	최우수		우수	IAQ Management Group
	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하		100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하		600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	
싱가포르	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하			3 ppm			환경부
한 국	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 (유지기준)			500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 (권고기준)			환경부

2.2.2 국내외 건축자재 인증제도

1) 외국의 건축자재 인증표시제도

환경라벨링은 제품에 대한 환경성 정보의 공개 및 전달수단으로서 가장 대표적인 제품중심 환경 정책도구이다. 환경라벨링은 1977년 독일에서 푸른천사(Blue Angel)라는 이름으로 가장 먼저 시작되었으며, 현재 1992년 시작된 우리나라의 환경마크를 비롯하여 유럽 회원국, 일본, 미국 등 전 세계 30여 개국에서 이를 도입, 운영 중에 있다. 선진국은 건축자재에 대해서도 시공자 뿐 아니라 일반인들이 친환경적인 제품을 쉽게 구별하여 선택할 수 있도록 건축자재에 대한 인증제도(labelling)를 실시하고 있으며 현재 북유럽의 핀란드, 독일, 일본 등 다수의 국가에서 실시하고 있다. 선진국은 이미 환경라벨링 국제표준화 규격 제 3 유형인 「환경성적표지규격」 제도를 도입·시행 중인데, 그 중 스웨덴은 “Certified Environment Product Declaration” 제도를 1998년부터 도입하여 ISO/TR14025에 가장 근접한 제도로 운영되고 있을 뿐만 아니라 매년 확대하고 있는 추세에 있다.

① 미국

미국의 건축자재 인증 프로그램은 민간 차원에서 활발히 이루어지고 있다. 카펫과 피혁협회(CRI : Carpet and Rug Institute)는 ASTM D5116 시험방법에 따라 <표 2.32>의 카펫 인증 프로그램을 제정하였고, 파티클보드협회(National Particleboard Association)는 <표 2.33>의 인증 프로그램을 제정하였다. 또한, Green Guard(비영리 단체)는 친환경 가구 및 전자재 등을 대상으로 <표 2.34>의 건축자재를 더욱 세분화한 인증 프로그램을 제정하였다. <표 2.35>는 미국 주택도시개발부(HUD)와 합판협회(HPVA)가 제정한 폼알데하이드 인증 프로그램이다.

<표 2.32> 미국 카펫과 피혁협회의 카펫 인증 프로그램

구 분	성 분	기 준($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$)
카펫	TVOC	0.5
	Styrene	0.4
	4-phenylcyclohexene	0.05
	HCHO	0.05
접착제	TVOC	10
	HCHO	0.05
	2-Ehtyl-1-Hexanol	3

<표 2.33> 미국 파티클보드협회의 인증 프로그램

구 분	기 준	HCHO	Loading Factor (ft^2/ft^3)
산업용 파티클보드	ANSI A208.1	0.3ppm	0.13
바닥용 파티클보드	ANSI A208.1	0.2ppm	0.13
테크용 파티클보드	HUD	0.3ppm	0.13
MDF	ANSI A208.2	0.3ppm	0.08

<표 2.34> 미국 Green Guard에 의한 친환경 가구 및 전자재 인증 프로그램

성 분	접착제 일반건축재 바닥재	가정용 가구	천정재 단열재	사무가구 (의자, 데스크 ,테이블 등)	페인트	벽지 직물 가구(워크스테 이션)
TVOC	$0.50\mu\text{g}/\text{m}^3$	$0.50\mu\text{g}/\text{m}^3$	$0.50\mu\text{g}/\text{m}^3$	$0.25\mu\text{g}/\text{m}^3$	$0.50\mu\text{g}/\text{m}^3$	$0.50\mu\text{g}/\text{m}^3$
HCHO	0.05ppm	0.05ppm	0.05ppm	0.025ppm	0.05ppm	0.05ppm
총 알데하이드	0.1ppm	0.1ppm	0.1ppm	0.05ppm	0.1ppm	0.1ppm
4-phenylcy clohexene	$0.0065\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-	$0.00325\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	$0.0065\mu\text{g}/\text{m}^3$
Stylene	$0.70\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-	-	$0.070\mu\text{g}/\text{m}^3$	-
분진	-	-	$0.05\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-	-

<표 2.35> 미국 HUD와 HPVA의 폼알데하이드 인증 프로그램

구 분	기 준	Loading Factor (ft^2/ft^3)
벽용합판	0.2ppm	0.29
파티클보드, 산업용 합판	0.3ppm	0.13

② 캐나다

캐나다 환경부에서 <표 2.36>의 접착제, 페인트, 카펫 등의 건자재 용도별 VOCs 함유량 및 독성물질 기준을 1988년부터 실시하고 있으며 29개 생활용품에 대해 환경에 유해한 정도, 재활용성, 인체 유해성, 폐기물활용 등을 평가하여 친환경 마크 부여하고 있다.

<표 2.36> 캐나다의 접착제, 페인트, 카펫 등의 건자재 용도별 VOCs 함유량 및 독성물질 기준

종 류	성 분	기 준	비 고
페인트	VOCs 함량	200g/L이하	
카펫	TVOC	0.25 μ g/m ³ h	24시간 이후
	HCHO	0.02 μ g/m ³ h	48시간 이후
카펫접착제	TVOC	0.05 μ g/m ³ h	72시간 이후
	HCHO	0.02 μ g/m ³ h	72시간 이후

③ 핀란드

핀란드는 건설정보센터(RTS)에서 주관하여 바닥재, 페인트 등 내장재에 대해 VOCs, 폼알데하이드, 암모니아, 발암성물질 등을 기준으로 <표 2.37>과 같이 M1, M2, M3, 3등급으로 인증하고 있다.

<표 2.37> 핀란드의 실내건축마감구성재료 분류체계

구 분	M1	M2	M3
VOCs	0.2 μ g/m³h	0.4 μ g/m³h	M2에서 정의한 범위를 넘는 물질
HCHO	0.05 μ g/m³h	0.125 μ g/m³h	
암모니아	0.03 μ g/m³h	0.06 μ g/m³h	
Benzene 등 1급 발암물질	0.005 μ g/m³h	0.005 μ g/m³h	
냄새	무취성의 재료(냄새에 대한 불만족도 15%이하)	강한 냄새가 나지 않는 재료(냄새에 대한 불만족도 30%이하)	
기타	플라스터 등에는 카세인이 포함되지 않아야 함		
대상자재	바닥재, 페인트, 니스, 보드류, 광물섬유, 플라스터, 첨가제 등		

스웨덴, 노르웨이, 핀란드, 덴마크의 연합체로 구성된 HVAC, 에너지, 건축환경, 의학 등을 전문으로 하는 학회인 SCANVAC은 VOCs에 의한 실내 공기환경의 규정을 폼알데하이드와 TVOC의 농도에 의하여 건축자재를 <표 2.38>과 같이 3단계로 분류하였다. 3단계의 분류는 각각 MEC-A (low-emission building materials), MEC-B(moderately emitting building materials), MEC-C(heavily emitting building materials)로 규정하고 있다. 여기서 MEC는 Material Emission Class의 약칭이다.

<표 2.38> SCANVAC 건축자재의 분류

방출강도의 분류	최대 방출강도(20 °C, RH 50%)
MEC-A	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$
MEC-B	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$
MEC-C	450 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$

④ 독일

독일은 소비자들로 하여금 환경친화적 상품을 구매토록 할 목적으로 1997년 독일 접착제 생산업체들이 GEV(Gemeinschaft Emissionskontrollierte Verlegewerkstoffe)라는 비영리단체를 만들어 <표 2.39>의 환경라벨링 실시하고 있으며, 현재 유럽 5개국, 30개 업체가 참가하여 400여 제품에 대해 EMICODE 등급(2000년 기준)을 부여하고 있다.

<표 2.39> 독일 GEV의 건축자재 인증기준

등급	방출량 범위	TVOC (프라이머)	TVOC (모르타르)	TVOC (접착제 등)
EMICODE EC1	매우 낮음	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
EMICODE EC2	낮음	100~300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	200~600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	500~1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
EMICODE EC3	다소 높은	300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상	600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상	1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상

독일 환경부에서 주관하여 88개 생활용품에 대해 환경에 유해한 정도, 재활용성, 인체 유해성, 폐기물활용 등을 평가하여 친환경 마크 부여하고 있다. 이 Blue Angel의 일환으로 환경부와 연방재료연구소가 <표 2.40>의 RAL-UZ38을 제정하여 챔버법에 의해 일정시간 경과 후 공기농도로 판정한다.

<표 2.40> 독일 환경부와 연방재료연구소의 RAL-UZ38 기준

구분	평면형상의 제품 (도어, 판넬, 적층플로어링, 목재바닥)		입방형상의 제품 (가구 등)	
	초기값 24시간 후	최종값 28일 후	초기값 24시간 후	최종값 28일 후
HCHO	-	0.05ppm	-	0.05ppm
VOCs	-	300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
SVOCs	-	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Benzene 등 1급 발암물질	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만

⑤ 일본

경제산업성, 일본공업규격협회(JIS) 주관으로 건축자재의 폼알데하이드 방출농도에 따라 <표 2.41>과 같이 F☆☆☆☆에서 등급외까지 4가지 등급을 부여(JIS)하고 있으며, 대상 자재확대 및 강화, 방출속도 개념을 적용하여 2003년 3월 20일 개정하였다.

<표 2.41> 일본 JIS의 폼알데하이드 방출기준

등 급	규 격			비 고
	방산속도 ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$)	방산량 (mg/L)	방산량 (mg/L)	
F☆☆☆☆	5이하	0.12이하	0.3이하	건축기본법상 제한없음
F☆☆☆	20이하	0.35이하	0.5이하	건축기본법사 면적제한
F☆☆	120이하	1.8이하	1.5이하	
등급외	120초과	1.8초과	1.5초과	건축기본법상 사용금지
적용자재	접착제류 6종 단열재류 3종	도료류 11종	보드류 2종 (섬유판, 파티클보드)	

농림성은 일본의 합판공업조합과 함께 일본농림규격(JAS)을 제정하였으며, <표 2.42>와 같이 합판 등의 폼알데하이드 방출량에 따라 기존 3등급으로 시행 하던 것을 2003년 2월에 상위등급을 추가하여 4등급으로 세분하고, 등급표시 기호를 변경하여 시행하고 있다.

<표 2.42> 일본 JAS의 합판 등의 폼알데하이드 방출량 기준

이전			개정		
표시기호	방산량(mg/L)		표시기호	방산량(mg/L)	
	평균치	최대치		평균치	최대치
			F☆☆☆☆	0.3	0.4
Fc0	0.5	0.7	F☆☆☆	0.5	0.7
Fc1	1.5	2.1	F☆☆	1.5	2.1
Fc2	5.0	7.0	F☆	5.0	7.0
적용자재	합판(보통 합판, 구조용 합판, 특수합판, 콘크리트 거푸집용 합판, 난연합판, 방염합판), 구조용 페널, 플로어링, 집성재, 단판적층재, 구조용 단판적층재				

2) 국내의 건축자재 인증표시제도

① HB(Healthy Building)등급(친환경 건축자재 인증등급)

한국공기청정협회에서 실시하며, 실내오염물질인 폼알데하이드 및 TVOC 발생 원이 되는 건축자재의 분류 방안으로 건물의 시공시 방출 강도가 낮은 등급의 자재를 선정하도록 유도하고, 적절한 건축자재의 선정으로부터 실내공기질을 개선하기 위하여 건축자재로부터 방출되는 폼알데하이드와 TVOC 농도의 인증등급을 <표 2.43>과 같이 설정하였다.

<표 2.43> HB 건축자재의 인증등급

구분 (mg/m ² · h)		일반자재	페인트	접착제
최우수 ★★★★★	TVOC	0.10 미만	0.10 미만	0.25 미만
	HCHO	0.03 미만	0.03 미만	0.06 미만
우수 ★★★★	TVOC	0.10 이상 ~ 0.20 미만	0.10 이상 ~ 0.20 미만	0.25 이상 ~ 0.50 미만
	HCHO	0.03 이상 ~ 0.05 미만	0.03 이상 ~ 0.05 미만	0.06 이상 ~ 0.12 미만
양호 ★★★	TVOC	0.20 이상 ~ 0.40 미만	0.20 이상 ~ 0.40 미만	0.50 이상 ~ 1.50 미만
	HCHO	0.05 이상 ~ 0.12 미만	0.05 이상 ~ 0.12 미만	0.12 이상 ~ 0.40 미만
일반 I ★★	TVOC	0.40 이상 ~ 2.00 미만	0.40 이상 ~ 2.00 미만	1.50 이상 ~ 5.00 미만
	HCHO	0.12 이상 ~ 0.60 미만	0.12 이상 ~ 0.60 미만	0.40 이상 ~ 2.00 미만
일반 II ★	TVOC	2.00 이상 ~ 4.00 미만	2.00 이상 ~ 4.00 미만	5.00 이상 ~ 10.00 미만
	HCHO	0.60 이상 ~ 1.25 미만	0.60 이상 ~ 1.25 미만	2.00 이상 ~ 4.00 미만

② KS마크

KS마크는 가구류의 소재인 합판, 섬유판, 파티클 보드류와 벽지, 벽지용 전분계 접착제 등을 폼알데하이드 방출량에 따라 <표 2.44>와 같이 등급화 하였다.

<표 2.44> KS 규격의 HCHO 방출량 기준

일반자재	등급	HCHO 방출량(mg/L)	
		평균	최대
합판(KS F 3101) 기타 합판류	F1	0.5	0.7
	F2	5	7
	F3	10	12
파티클보드(KS F 3104) 섬유판(KS F 3200) 치장 목질 플로어링보드(KS F 3126)	E0	0.5	
	E1	1.5	
	E2	5	
무늬목 치장합판 플로어링보드 (KS F 3111)	일반용	10	12
벽지(KS M 7305)	온돌용	5	7
벽지(KS M 7305)	-	2	
벽지용 전분계접착제(KS F 3217)		5	

③ 환경마크

환경부가 관련 법령의 제정, 환경라벨링 대상제품의 선정 등 제도의 전반적인 사항을 관장하고 민간단체인 환경마크협회에서 환경표지 사용 인증, 인증제품의 사후관리 등 실질적인 집행업무를 수행하고 있다. 환경마크협회는 1992년 4월부터 환경마크제도(환경표지)를 시행하고 있으며 건축자재 분야에 41개 업체(144개 자재)에 대해 인증(페인트, 벽지, 보온단열·흡음재, 실내용 장식 바닥재 등)하며, 제품(원목을 주원료로 한 제품은 제외)에서 발생하는 VOCs의 28일 후 방산량은 $0.2\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 이하이거나 7일 후 방산량이 $0.4\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 이하를 기준으로 한다. <표 2.45>는 목재 바닥재의 HCHO 방출량 기준의 예를 나타낸 것이다.

<표 2.45> 목재 바닥재의 HCHO 방출량 기준(예)

구분	파티클보드	섬유판	기타재료
HCHO 방산량 [mg/L]	1.5이하	1.5이하	0.5이하

<표 2.46>은 국내에서 시행하고 있는 건축자재 인증제도를 비교하여 나타낸 것으로 현재 민간에서 주도하고 있는 HB제도가 가장 활발히 시행되고 있다.

<표 2.46> HB마크, KS마크, 환경마크의 비교

구분	HB마크	KS마크	환경마크
인증기관	한국공기청정협회	한국표준협회	환경마크협회
법적근거	다중이용시설 등의 실내공기질 관리법	산업표준화법 제 11조, 13조	환경기술개발 및 지원에 관한 법률 제 20조
시험항목 (환경성 관련 항목)	2항목 실내공기 (HCHO, TVOC)	1항목 (HCHO)	12항목 실내공기 (HCHO, TVOC, VOCs 등) 중금속 등 유해물질 함량 (납, 카드뮴, 비소, PBBs 등) 자원 및 에너지, 소비 등 환경전반 평가
인증성격	민간 자율인증	산자부 공식인증	환경부 공인 인증

2.3 실내공기오염물질 측정 및 분석방법

2.3.1 건축자재 실내공기오염물질 방출시험방법

건축자재로부터 방출 되는 실내공기오염물질은 낮은 농도로 서서히 방출되기 때문에 측정 방법에 따라 큰 오차를 나타낼 수 있다. 건축자재로부터 방출되는 화학물질을 측정하는 방법은 소재측정법, 데시케이터법, 방출시험챔버법 등으로 구분할 수 있다.

소재측정법은 건축자재를 분쇄하여 그 성분을 측정하는 방법으로 건축자재 내부에 포함된 화학물질의 종류와 농도로 표시된다. 따라서, 건축자재를 구성하는 화학물질을 분석하는 방법으로 사용할 수는 있지만, 실내 공기 중에 방출되는 오염물질을 파악하기에는 곤란한 방법이다.

데시케이터법은 일본의 JAS(Japanese Agricultural Standard)에서 채택하고 있는 폼알데하이드의 방출농도를 측정하는 방법이다. 데시케이터 용량 9~11L 내부의 온도를 일정하게 유지하고 밀폐된 공간에 시험편(15cm×15cm)10매를 위치시키고 폼알데하이드의 포집제로 물에 흡수되어 수용액 상태로 된 것을 일정시간(24시간) 경과 후, 아세틸아세톤법에 의한 비색법을 이용하여 농도를 측정하는 방법이다. 이 방법은 건축자재의 양면과 측면으로부터 방출되는 농도를 측정하게 되므로 일반적인 실내공간에서의 방출특성과는 차이가 있다. JAS는 일반합판, 구조용합판, 특수합판, 복합바닥재료 등에 적용되고 있다. 폼알데하이드의 수용액 농도에 의해 재료를 F1, F2, F3로 구분하여 규격을 정하고 있다. 데시케이터법은 건축자재의 내부에 함유된 물질의 농도를 측정하는 방법으로 일반적으로 실내의 표면에서 방출되는 화학물질의 농도를 측정하는 방법으로는 적절하지 않은 것으로 평가되고 있다. 데시케이터에 의한 포름알데히드 측정방법은 국내 실내공기질 공정시험방법에 명시되어 있으며, 이 시험방법은 상온 상습상태(온도 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, 습도 $65\pm 5\%$)에서 목재 자재에서 방출되는 포름알데히드를 측정하는 경우에 한하여 적용한다.²⁹⁾

방출시험 챔버법은 미국의 ASTM과 유럽연합(ECA)에서 챔버방식에 의한 규격을 정하고 있다. 챔버는 유리나 스테인레스로 제작되며 대형챔버법과 소형챔버법으로 구분하고 있다. 대형챔버는 가구류 등을 내부에 설치하여 측정이 가능하도록 구성된 것이며, 소형챔버는 건축자재 표면에 설치하는 방법(FLEC법)과 챔

29) 실내공기질공정시험방법, 환경부고시 제2004-80호(2004. 6. 5), p.173

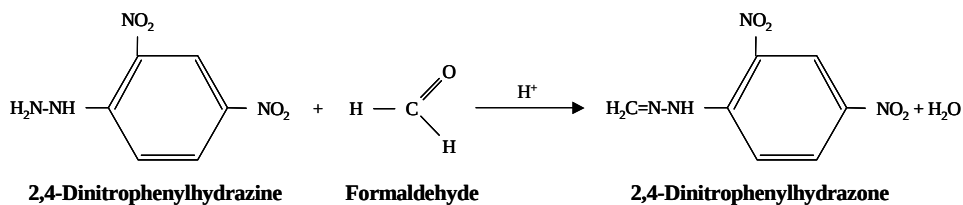
버내부에 건축자재를 설치하는 방법(small chamber)으로 구분하고 있다. 최근에는 실내의 표면에서 방출 되는 화학물질량을 측정하는 방출시험 챔버법이 평가 기법으로 많이 사용되고 있다.

최근 국내는 방출시험 챔버법 중 소형챔버법을 기본으로 하여 2004년 5월에 친환경 건축자재 단체품질인증 시험방법 <소형챔버법>을 제정하여 시행하고 있다.

2.3.2 폼알데하이드 및 TVOC 분석방법

1) 폼알데하이드 분석방법

폼알데하이드를 분석하는 방법은 폼알데하이드를 포함하고 있는 배출가스를 크로모핀산과 아세틸아세톤을 함유한 흡수액에 각각 포집한 후 가운 발색시켜 흡광도를 측정하는 크로모핀산법과 아세틸아세톤법이 있으며, 최근에는 2,4-DNPH(2,4-Dinitrophenylhydrazine) 카트리지를 이용하는 2,4-DNPH 유도체화 방법이 사용되고 있다. 2,4-DNPH 유도체를 고성능액체크로마토그래프(HPLC)에 주입하여 자외선흡광검출기의 흡수파장 360nm 에서 검출되는 크로마토그램의 높이 또는 면적 등으로 포름알데히드의 농도를 구하며, 반응식은 (그림 2.1)로 표시된다.



DNPH 카트리는 4cm의 폴리프로필렌(P·P)재질의 형식으로 양 끝에 폴리에틸렌(P·E) Filter가 있으며, 중간부분은 고순도로 정제된 DNPH가 충전되어 있다. 폼알데하이드 측정시 오존이 존재하면 DNPH 유도체가 감소되거나, DNPH가 오존과 반응하여 인위적인 불순물이 형성되는 등의 방해물질로 작용되므로, 이러한 오존의 방해를 최소화하기 위해서 KI가 채워진 오존 스크루버를 DNPH 카트리의 전단부에 설치하고 차광에 대해서는 알루미늄 호일을 이용하여 DNPH

카트리지의 외벽을 감싸준다.

2,4-DNPH 유도체화 방법의 국제 규격으로는 ISO 16000-3, EPA METHOD TO-11, NIOSH 2016, ASTM D5197이 있으며, 국내의 실내공기질공정시험방법 또한, 이 규격을 따르고 있다.

이외 폼알데하이드를 간이시험방법 중 정색반응은 육안으로 확인하는 방법으로 검지지법이나 검지관법 흡광도를 측정하는 흡광광도계와 반사광을 측정하는 광전광도법이 있다. 샘플 방법에 따라 버블러 흡수법과 확산흡수 흡착법이 있으며, 광학적 원리를 이용하는 폼알데하이드 흡수 반응시 발광을 이용하는 화학발광법이 있다. 전기화학적 검출법으로는 정전위전해법과 가르바니셀법 연료전지법이 있다.

2) TVOC 측정 및 분석방법

VOCs 시료를 채취하는 방법에는 시료의 채취와 동시에 분석을 할 수 있는 On-Line 측정방법, Canister 또는 일정한 용기를 이용하는 용기채취법, 흡착제나 흡수액을 이용하여 시료를 채취하는 고체흡착용매추출법과 고체흡착열탈착법 등으로 크게 3가지로 구분 할 수 있다. 이러한 측정방법들은 각각 몇 가지 장·단점이 있으며, 측정하고자 하는 대상물질과 분석대상물의 성상 등에 따라 측정방법이 결정되기도 한다.

On-line 측정 방법은 일정한 용기나 흡착제를 사용하지 않으며 시료의 저장에 필요 없어 현장에서 직접 측정 및 분석이 가능하다는 장점이 있으나, 분석장비와 장치의 이동이 어려운 단점이 있다.

용기채취법은 주로 TO-14에서 일반 환경 대기 중 VOCs의 분석방법으로 사용되고 있다. Canister의 내부표면에는 채취하고자 하는 대상물질이 흡착되는 것을 방지하기 위하여 매끄러운 니켈과 크롬산화물과 같은 불활성 물질이 코팅되어 있거나 실리카로 코팅되어있는 스테인레스 스틸 용기를 사용한다. Canister를 사용하는 용기채취법은 주로 비극성물질을 대상으로 측정한다. 이러한 용기채취법은 시료의 Breakthrough이 야기되지 않고 채취된 시료에 대해서 열탈착 과정이 필요 없지만 시료의 채취장치에서 시료의 오염문제 발생, 분석범위의 제한 등 단점이 있다. Canister에 채취된 시료는 농축과정을 거쳐 GC에 주입하여 분석한다.

고체흡착용매추출법은 흡착제를 충전한 채취관에 시료를 채취하는 방법으로 고체흡착법과 유사하지만 열탈착 시키는 고체흡착열탈착법과는 달리 추출용매를 이용하여 시료를 회수한다는 점에서 차이가 있다. 또한, 분석횟수에 제한이 있는

고체흡착열탈착법에 비해 용매추출법은 수회의 분석이 가능하고 채취효율이나 용매에 따른 회수율이 양호하며 비교적 간편하고 비용이 적게 든다. 그러나 용매 추출법에 사용되는 흡착제는 흡착력이 강하기 때문에 반응성이 큰 물질의 보존 시 분해에 따른 손실에 주의해야 하며, 회수되는 시료의 순도도 매우 중요하다.

고체흡착열탈착법은 흡착제를 충전한 흡착튜브를 이용하여 고체흡착제의 표면에 채취하고자 하는 물질을 흡착시키고 열탈착 시킨 후 분석하는 방법으로 EPA의 TO-17에서 자세히 소개되고 있다. 대상은 VVOCs 에서부터 SVOCs까지이며, 흡착튜브는 주로 외경이 1/4inch (6mm)인 스텐레스나 유리재질에 고체흡착제가 200mg이상 충전되어 있다. VOCs 측정에 사용되는 흡착제의 세기는 흡착제의 단위표면적(Specific surface area)에 따라 50m²/g 보다 작은 것을 약한 흡착제, 100~500m²/g인 것을 중간 흡착제, 1000m²/g정도의 것을 강한 흡착제로 구분한다. 흡착튜브를 이용하여 VOCs 물질을 측정하고자 하는 경우에는 무엇보다도 측정 대상물질에 대한 적절한 흡착제의 선택이 중요하다. 고체흡착열탈착법은 Canister에 비해 대상물질의 범위가 비교적 광범위하고 경제적이며 비극성물질과 극성물질 모두 사용이 가능하다. 그러나 Breakthrough 문제발생, Artifact 형성의 문제, C₂이하의 저분자 VOCs의 채취에는 부적합하며, 분석기회의 제한 등 단점을 가지고 있다. 흡착튜브에 채취된 시료는 열탈착 과정을 통한 후 GC로 주입되어 분석된다. 고체흡착열탈착법의 국제 기준은 ISO 16017-1, ISO 160172, EPA Method TO-17, ASTM D6196, NIOSH 2549 등에 명시되어 있다.

국내 다중이용시설의 실내공기질 시험방법에는 고체흡착열탈착법을 주시험법으로 하고 있으며, 용기채취법과 고체흡착용매추출법은 부시험법으로 채택하고 있다. 이외에 작업장은 Passive Sampler를 이용하여 VOCs의 농도를 측정하고 있다.

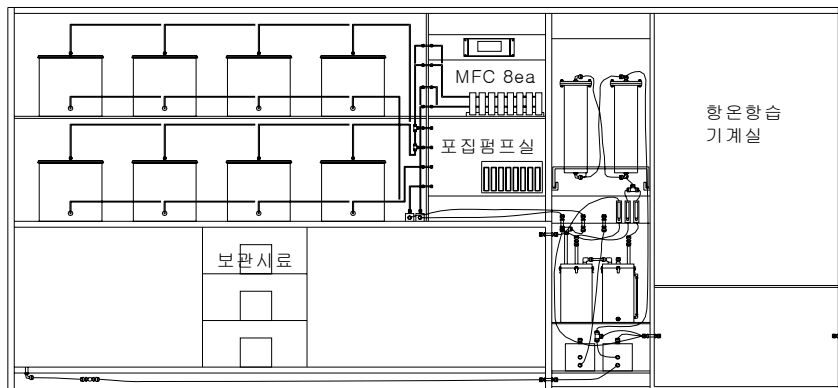
제 3 장 건축자재 종류별 오염물질 방출강도 분석

본 장은 건축자재로부터 방출되는 다양한 오염물질 중 새집증후군의 주요 원인 물질로 알려져 있는 폼알데하이드와 TVOC를 중심으로, 국내에서 생산되는 주요 건축자재 100종을 용도별, 성분별로 분류·시험하여 방출강도와 특성 그리고 실내공기오염물질의 원인이 되는 주요 건축자재를 파악하였다. 건축자재 오염물질 방출강도 시험은 친환경 건축자재 단체품질인증 시험방법에 맞게 설계·제작된 소형챔버를 이용하였다.

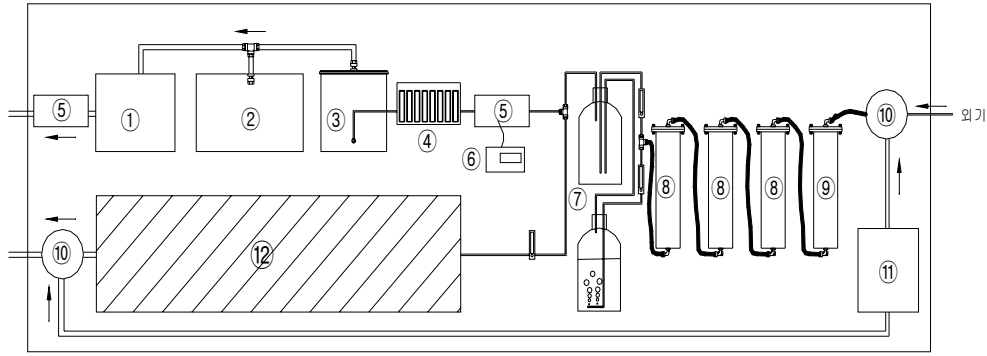
3.1 건축자재 오염물질 방출강도 시험 및 분석

3.1.1 건축자재 방출강도 시험장치

시험장치는 향온향습조 내에는 총 8개의 소형챔버를 설치할 수 있도록 2단으로 설계되었으며, 챔버실, 재료보관실, 공기공급장치, 공기필터장치, 습도조절 및 분배장치, 유량조절 및 채취실, 향온향습기계실 등이 일체로 구성되어 있다. 향온향습조 내의 공기는 외부공기를 끌어들여 HEPA 필터에 의해 청정하게 공급되고, 측정 조건에 따라 $25 \pm 1^\circ\text{C}$, $50 \pm 5\%$ 로 유지된다. (그림 3.1)과 (그림 3.2)는 각각 건축자재 실내공기오염 방출시험 장비와 일체화 하기위한 향온향습조 설계도면과 시스템 구성도이며, <표 3.2>는 시험장비의 세부장치의 규격이다.



(그림 3.1) 실내공기오염물질 방출시험장치 설계도



(그림 3.2) 시험챔버 시스템 계통도

<표 3.1> 건축자재 실내공기오염물질 방출시험장치 각부 설명 및 규격

명칭	규격	명칭	규격
① MFC	Model3660-Air-500sc cm-1/4 sw×8 ea MR-5000 × 1ea	⑦ 습도조절기	3차 증류수, Stainless
② 채취용 펌프	SIBATA Σ 30 × 8 ea	⑧ 필터 (활성탄)	Ø90, H400, × 3 ea, 8-30 Mesh
③ 소형 챔버	20 ℓ, SUS 316, TEFLON Sealing	⑨ 필터 (실리카겔)	Ø90, H400, × 1 ea, 블루 실리카겔
④ 볼 유량계	200cc × 8 ea, Dwyer	⑩ 공기 공급용 펌프	TEFLON-FITTED P.025 PLACTIC PUMP × 2 ea
⑤ 분배기	8 Port	⑪ 공기압축기	공기공급용펌프 구동용, 30 ℓ
⑥ 온습도계	TR 72S Thermo Recorder	⑫ 시료보관실	2540×600×720, 시료 12개 보관

건축자재로부터 방출되는 폼알데하이드 및 TVOC 방출강도를 측정하기 위한 시험장치의 운전조건은 <표 3.2>와 같으며, 건축자재에서 방출하는 오염물질의 채취방법은 <표 3.3>과 같다.

<표 3.2> 소형챔버의 시험 조건

항 목	기호(단위)	시험조건	
		TVOC	HCHO
채취용량	V(ℓ)	4.5	4.5
채취시간	T(min)	30	30
채취유량	Q(ml/min)	150	150
환기량	q(m³/hr)	0.02	
환기회수	N(회/hr)	0.5	
챔버용적	v(m³)	0.02	
부하율	L(m³/m²)	2 (액상은 0.4)	
시료크기	A(m²)	0.0225 × 2개	
온도	Temp.(℃)	25±1	
상대습도	RH(%)	50±5	

<표 3.3> 건축자재 오염물질 채취방법

채취	HCHO	· 2,4-DNPH Silica Cartridge (Supelco, S10, U.S.A) · 오존 스크루머(Waters, U.S.A)
	TVOC	· Tenax-TA(60/80mesh, Supelco, U.S.A)
샘플링	HCHO	· 디지털 미량펌프(Sibata MP-Σ300) 150ml/min으로 30분 동안 총 4.5ℓ
	TVOC	· 디지털 미량펌프(Sibata MP-Σ30) 150ml/min으로 30분 동안 총 4.5ℓ
보관	· 4℃이하 냉장고에 보관(차광용 보관용기에 개별포장)	

3.1.2 폼알데하이드 및 TVOC 분석

건축자재 오염물질 방출강도 시험장치에서 채취한 시료는 실내공기질공정시험 방법에 따라 다음의 분석 방법에 따라 정밀하게 분석하였다.

1) 폼알데하이드 분석법

폼알데하이드 분석은 실내공기질공정시험법에 따라 (그림 3.3)과 같은 고성능 액체크로마토그래피(HPLC)를 이용하여 <표 3.4>의 조건으로 분석하였다.

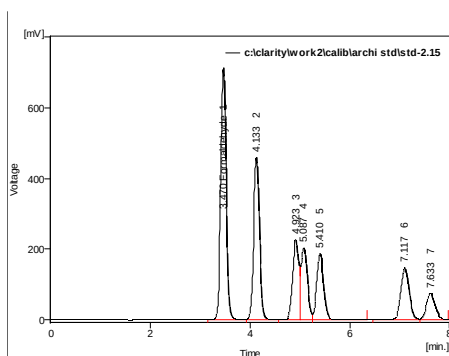
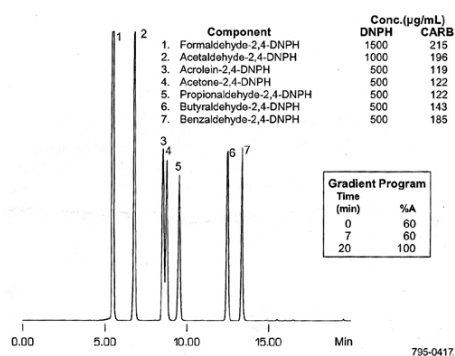


(그림 33) 고성능 액체크로마토그래피 (HPLC)

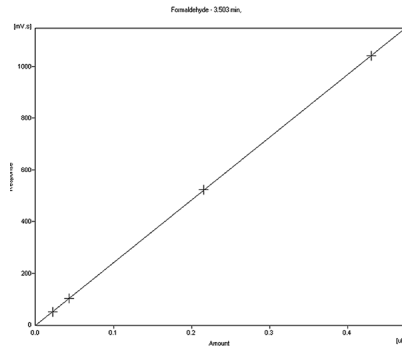
<표 3.4> HPLC 규격 및 분석 조건

HPLC system	Gilson HPLC 305 system
Injector	Gilson 7125-081
Analytical Column	Waters Symmetry C-18(길이 250 x 내경 4.6 mm, 두께 5 μ m)
Detector	UV-VIS Detector,
Mobile phase	Acetonitrile (A) / Water (B)
Gradient Elution	0~15 min : A/B = 70/30 (Isocratic)
Detection	Absorbance at 360 nm
Flow Rate	1.3 mL/min
Injection Volume	20 μ l

분석에는 (그림 3.4)의 폼알데하이드와 6종 카르보닐 물질이 혼합된 표준물질을 사용하였고, 이를 분석한 크로마토그램은 (그림 3.5)와 같다. 검량선 작성을 위하여 표준물질을 분석 시료의 농도에 맞게 4단계로 희석하여 분석한 검량선은 (그림 3.6)과 같으며, 이때 상관계수는 0.9999 이상으로 나타났다.



(그림 3.4) 카르보닐 7종 표준물질 (예) (그림 3.5) 카르보닐 7종 표준물질 (분석)



(그림 3.6) HCHO 검량선

2) TVOC 측정 및 분석법

TVOC 측정 및 분석은 <표 3.4>의 사양을 갖춘 (그림 3.7)의 TDS A2(Gerstel, Germany) 열탈착기와 GC/MSD (Agilent 6890N; Agilent 5973I U.S.A)를 사용하였다. 분석조건은 <표 3.5>와 같다.



(그림 3.7) 기체크로마토그래피(GC-MSD)와 열탈착기(ATD)

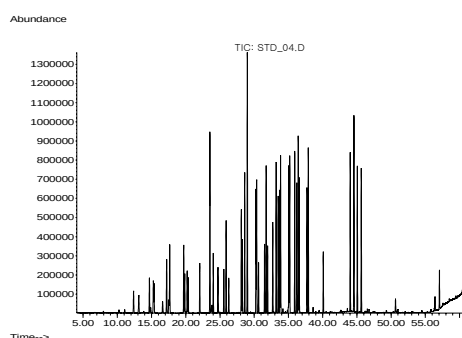
<표 3.5> 열탈착/저온농축-GC/MS 규격

GC/MS	GC	Agilent 6890N GC, USA
	MSD	Agilent 5973 inert MSD, USA
	컬 럼	HP-VOC 60m, I.D 0.2mm, Film 1.12 μ m
열탈착/ 저온농축장치	제작사	GERSTEL, Germany
	열탈착기	TDS 2-7 (Thermo Desorption System)
	저온농축장치	CIS4 (Cooled Injection System) with LN ₂ (-150℃)
	자동시료주입기	TDS A2 (Thermo Desorption Autosampler)
샘플링 튜브	Tenax Tube	Thermal Desorption Sampling Tube (Part No. 28271-U), SUPELCO, U.S.A 17.8Cm Length × 6mm OD × 4mm ID

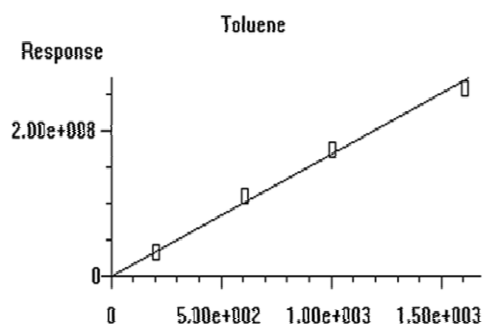
<표 3.6> 열탈착/저온농축-GC/MS 분석조건

TDS (GERSTEL, Germany)		GC/MSD(Agilent 6890N, USA)	
Purge Temp and time.	30℃, 0.05min	GC Column	HP-VOC (0.2mm, 60m, 1.12 μ m)
Desorb time and flow	8.55min, 5ml/min	Initial Temp.	40 ℃ (5 min)
Desorb Temp.	240℃	Oven Ramp Rate 1	4℃/min (40 ~ 200℃)
Cold trap holding time	5min	Oven Ramp Rate 2	20℃/min (200 ~ 250℃)
Cold trap high temp.	280℃	Final Temp.	250℃ (3min)
Cold trap low temp.	-50℃	Column Flow	0.8ml/min
Cold trap packing	Tenax TA	MS Source Temp.	230℃
Split	25 : 1	Detector Type	EI(Quadropole)
Valve temp.	No Valve	Mass Range	35 ~ 350 amu
Transfer line temp.	250℃	Electron Energy	70 eV

검량선 작성에는 60여종의 VOCs가 혼합된 액상 표준용액을 사용하였다. 이 액상표준용액을 분석한 결과는 (그림 3.8)과 같으며, 이 용액을 이용하여 작성한 Toluene 검량선은 (그림 3.9)와 같다. 여기서 TVOC의 정의는 가스크로마토그래프에 의하여 n-Hexane에서 n-Hexadecane까지의 범위에서 검출되는 VOCs들을 Toluene으로 환산하여 정량한 것이다.



(그림 3.8) Toluene(200ng)을 포함한
60종 VOCs 표준물질



(그림 3.9) Toluene 검량선

3.2 건축자재 방출강도 시험결과

공동주택에 사용되는 건축자재 중에서 사용 비율이 높은 벽지, 접착제, 바닥재를 대상으로 <표 3.7>과 같이 분류하여 건축자재 실내공기오염물질 방출시험을 실시하였다.

<표 3.7> 시험 대상 건축자재 수량 및 종류

분류	소분류	수량		업체수	비고
벽지	실크벽지	26종	43종	14	
	종이벽지	12종			
	초배벽지	5종			
접착제	도배용	5종	32종	10	
	목재용	13종			
	PVC접착용	3종			
	타일용	4종			
	마루바닥판용	5종			
	틈접착용	2종			
바닥마감구 성재	온돌마루용	5종	8종	6	
	바닥틈용	3종			
기타	기타 건축자재	17종	17종	15	레미탈, 석고보드, 석고퍼터, 방수재, 타일, 바인더 등
총 합계		100종		45업체	

3.2.1 벽지 시험 결과 분석

벽지는 공동주택 내부에 시공되는 여러 건축자재 중 면적을 가장 많이 차지한다. 우리나라 벽지업계는 크게 3대 메이저 회사와 10여개의 중견업체 그리고 약 40여개의 군소 업체로 구분되며, 이 중 웹사이트(web-site)를 통해 접할 수 있는 업체는 약 25개 정도이다. 이들에 의해 생산되는 벽지는 약 220여종이 되는 것으

로 파악되고 있다. 벽지의 구분은 원료(소재), 가공방법, 무늬모양에 의하여 분류하며, 시공순서에 따라서,는 초배벽지와 정배벽지로 구분할 수 있다. 벽면의 마감상태가 고르지 못할 경우에 초배벽지를 시공하며, 벽면이 양호할 경우에도 소비자가 요구에 의해 초배벽지를 시공하기도 한다. 최근에는 친환경성이 강조되어 숲 또는 황토를 이용한 초배벽지가 유통되고 있다. 정배벽지는 디자인과 색상이 실내로 노출되는 벽지이며, 종이벽지와 실크벽지(염화비닐벽지 또는 PVC벽지)로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 14개 업체에서 생산하는 벽지 중 종이벽지 12종, 실크벽지 26종, 초배벽지 5종, 총 43종을 대상으로 오염물질 방출강도를 시험하였다. <표 3.8>은 본 연구에서 시험한 벽지의 폼알데하이드와 TVOC 방출강도 분석 결과이다.

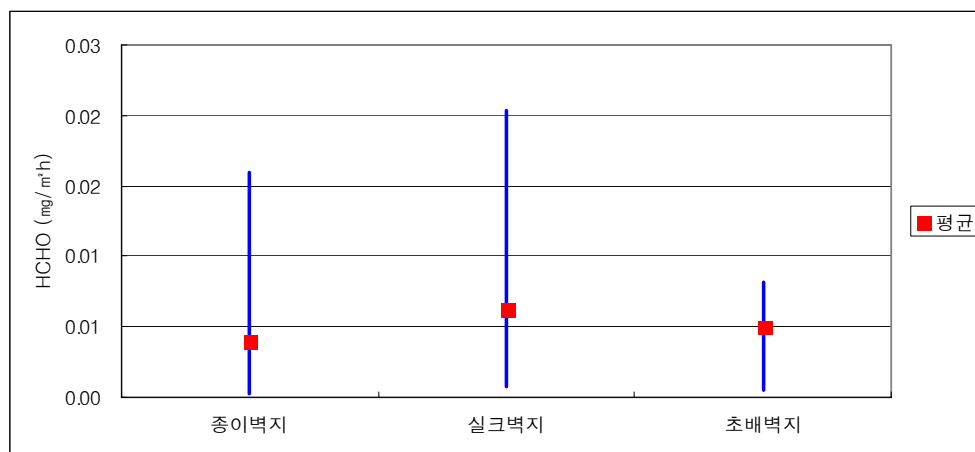
<표 3.9>와 (그림 3.10)은 종이벽지와 실크벽지 그리고 초배벽지의 폼알데하이드 방출강도를 비교한 것이다. 폼알데하이드 방출강도의 경우, 종이벽지가 $0.000 \sim 0.016 \text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$, 평균 $0.004 \text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$, 실크벽지는 $0.001 \sim 0.008 \text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$, 평균 $0.006 \text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$, 초배벽지 $0.001 \sim 0.008 \text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$, 평균 $0.005 \text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 나타났다. 평균 방출강도를 기준으로 실크벽지 > 초배벽지 > 종이벽지 순으로 낮게 나타났다지만, 차이는 크지 않았다. 세 종류의 벽지 모두 친환경 건축자재 단체품질 인증등급 중 최우수로 나타났다.

<표 3.8> 벽지 종류별 HCHO, TVOC 방출강도 및 6종 VOCs 방출량

구 분		HCHO (mg/m ³ · h)		TVOC (mg/m ³ · h)		6종 VOCs 방출량 (μg/m ³)					가격/m ²
		방출 강도	등급	방출 강도	등급	Benzene	Toluene	Etylben zene	Xylene	Stylene	
중 이 벽 지	PWP-001	0.016	최우수	0.161	우수	0.000	3.589	0.000	0.184	0.476	848
	PWP-002	0.006	최우수	0.232	양호	0.000	5.407	0.469	1.036	0.189	1514
	PWP-003	0.000	최우수	0.092	최우수	0.000	1.647	0.000	0.147	0.000	788
	PWP-004	0.002	최우수	0.117	우수	0.000	4.924	0.000	0.209	0.000	785
	PWP-005	0.005	최우수	0.016	최우수	0.000	2.660	0.000	0.140	0.000	786
	PWP-006	0.003	최우수	0.012	최우수	0.000	11.878	0.000	0.369	0.000	788
	PWP-007	0.001	최우수	0.012	최우수	0.000	1.882	0.000	0.144	0.000	909
	PWP-008	0.003	최우수	0.011	최우수	0.000	5.447	0.000	0.378	0.000	786
	PWP-009	0.001	최우수	0.009	최우수	0.000	0.749	0.000	7.829	0.000	909
	PWP-010	0.004	최우수	0.009	최우수	0.000	2.540	0.000	0.087	0.000	909
	PWP-011	0.004	최우수	0.010	최우수	0.000	4.371	0.000	2.667	0.000	909
	PWP-012	0.003	최우수	0.102	우수	0.000	30.782	0.000	0.233	0.440	909
실 크 벽 지	SWP-001	0.008	최우수	7.526	등급외	0.000	1.873	0.000	0.109	0.000	1812
	SWP-002	0.008	최우수	0.640	일반1	0.000	3.524	0.000	0.116	0.000	1512
	SWP-003	0.011	최우수	3.730	일반2	0.000	1.729	0.000	0.116	0.000	1814
	SWP-004	0.013	최우수	0.343	양호	0.000	47.433	0.000	1.060	0.000	1814
	SWP-005	0.020	최우수	1.365	일반1	0.000	1.029	0.000	0.322	0.000	1633
	SWP-006	0.009	최우수	3.250	일반2	0.000	7.960	0.000	0.376	0.000	1814
	SWP-007	0.001	최우수	1.310	일반1	0.000	15.660	0.000	0.707	0.000	1633
	SWP-008	0.009	최우수	1.011	일반1	0.000	3.838	0.000	0.533	0.000	1633
	SWP-009	0.007	최우수	2.811	일반2	0.000	19.127	0.364	0.784	0.000	1512
	SWP-010	0.019	최우수	1.896	일반1	0.000	11.731	0.000	0.789	0.000	1812
	SWP-011	0.002	최우수	4.726	등급외	0.149	12.960	0.000	0.818	0.000	3019
	SWP-012	0.007	최우수	4.166	등급외	0.000	4.171	0.440	0.949	0.000	1814
	SWP-013	0.001	최우수	3.740	일반2	0.000	0.824	0.000	0.393	0.000	1814
	SWP-014	0.008	최우수	1.361	일반1	0.000	1.247	0.000	0.178	0.000	2873
	SWP-015	0.002	최우수	5.154	등급외	0.000	0.920	2.424	19.218	0.000	1826
	SWP-016	0.002	최우수	0.291	양호	0.000	0.596	0.000	0.122	0.000	1826
	SWP-017	0.003	최우수	0.282	양호	0.000	0.967	0.000	2.376	0.000	7561
	SWP-018	0.002	최우수	1.363	일반1	0.000	1.069	0.000	0.145	0.000	1814
	SWP-019	0.008	최우수	0.343	양호	0.000	0.738	0.000	1.427	0.000	3628
	SWP-020	0.004	최우수	0.375	양호	0.000	10.027	1.231	5.904	0.000	3628
	SWP-021	0.004	최우수	1.666	일반1	0.000	2.102	0.000	0.104	0.000	1814
	SWP-022	0.004	최우수	1.553	일반1	0.000	3.504	0.000	0.102	0.000	2419
	SWP-023	0.004	최우수	10.824	등급외	0.000	0.260	0.000	0.000	0.000	1198
	SWP-024	0.004	최우수	1.875	일반1	0.000	0.649	0.000	0.073	0.000	1512
	SWP-025	0.004	최우수	2.397	일반2	0.000	0.753	0.000	2.976	0.000	1814
	SWP-026	0.001	최우수	2.348	일반2	0.000	1.940	0.000	0.509	0.000	1826
초 배 벽 지	FWP-001	0.008	최우수	0.027	최우수	0.000	0.369	0.000	0.082	0.000	숫 종이
	FWP-002	0.007	최우수	0.134	우수	2.071	76.469	4.973	4.042	0.000	숫 종이
	FWP-003	0.007	최우수	0.001	최우수	0.000	1.409	0.780	1.529	0.000	숫 종이
	FWP-004	0.001	최우수	0.004	최우수	0.000	0.360	0.000	0.071	0.000	숫 종이
	FWP-005	0.002	최우수	0.004	최우수	0.000	2.433	0.000	0.118	0.000	펄프

<표 3.9> 벽지 종류별 HCHO 방출강도 비교

구 분		종이벽지 (mg/m ² · h)	실크벽지 (mg/m ² · h)	초배벽지 (mg/m ² · h)
HCHO	최대	0.016	0.020	0.008
	최소	0.000	0.001	0.001
	평균	0.004	0.006	0.005

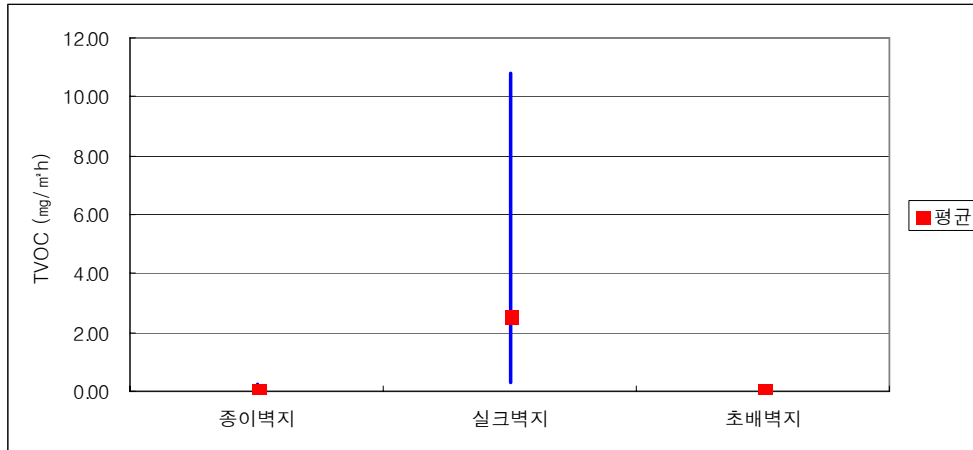


(그림 3.10) 벽지 종류별 HCHO 방출강도 비교

<표 3.10>과 (그림 3.11)은 종이벽지와 실크벽지 그리고 초배벽지의 TVOC 방출강도를 비교한 것이다. TVOC 방출강도의 경우, 종이벽지, 초배벽지와 실크벽지의 차이가 매우 큰 것을 알 수 있다. 종이벽지는 0.009~0.232mg/m² · h, 평균 0.058mg/m² · h, 초배벽지는 0.001~0.134mg/m² · h, 평균 0.034mg/m² · h, 실크벽지는 0.282~10.824mg/m² · h, 평균 2.552mg/m² · h로 나타났다. 평균 방출강도를 기준으로 실크벽지 > 종이벽지 > 초배벽지 순으로 낮게 나타났다. 주목할 점은 종이벽지의 최대값은 0.232mg/m² · h이며, 실크벽지에서 최소값은 0.282mg/m² · h로 종이벽지와 초배벽지의 최대값보다 실크벽지의 최소값이 더욱 큰 것으로 나타나 제품간의 뚜렷한 차이가 있었다. 또한, 실크벽지에서 현재 다중이용시설등의실내공기질관리법에서 사용을 금지하고 있는 4mg/m² · h 이상의 제품이 5건 나타났다.

<표 3.10> 벽지 종류별 TVOC 방출강도 비교

구 분		종이벽지 (mg/m ² · h)	실크벽지 (mg/m ² · h)	초배벽지 (mg/m ² · h)
TVOC	최대	0.232	10.824	0.134
	최소	0.009	0.282	0.001
	평균	0.065	2.552	0.034



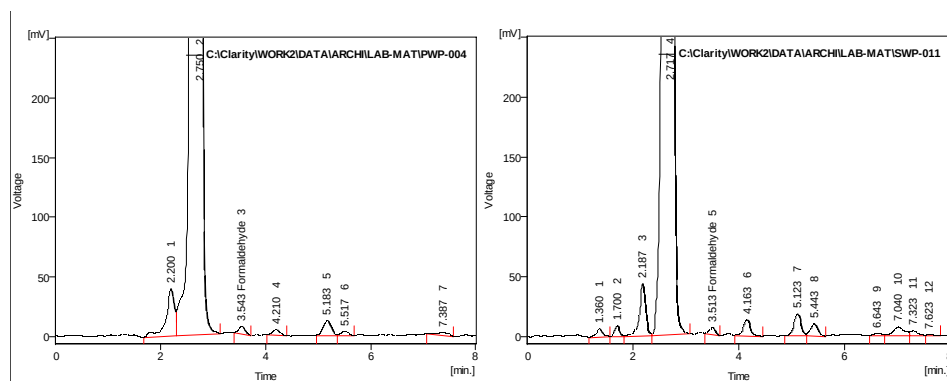
(그림 3.11) 벽지 종류별 TVOC 방출강도 비교

다중이용시설등의실내공기질관리법에서 공동주택의 측정항목인 6종 VOCs Benzene, Toluene, Etylbenzene, Xylene, Stylene, 1,4-Dichlorobenzene 중에서 Benzene은 종이벽지에서 검출되지 않았으며, 실크벽지와 초배벽지에서 각 1개 제품에서 검출되었으나 매우 미량이었다. Toluene은 모든 제품에서 검출되었으며, 종이벽지와 실크벽지보다 초배벽지에서 다소 많이 검출되는 것으로 나타났다. Etylbenzene은 종이벽지 1제품, 실크벽지 4제품, 초배벽지 2제품에서 검출되었다. Xylene은 실크벽지 1제품을 제외한 모든 제품에서 검출되었다. Stylene은 종이벽지에서만 3제품에서 검출되었으나, 검출된 물질의 양이 매우 미량인 것으로 나타났다. <표 3.11>은 종이벽지, 실크벽지, 초배벽지 모두에서 검출된 Toluene과 Xylene의 결과를 나타낸 것이다.

<표 3.11> 벽지 종류별 VOCs 방출량

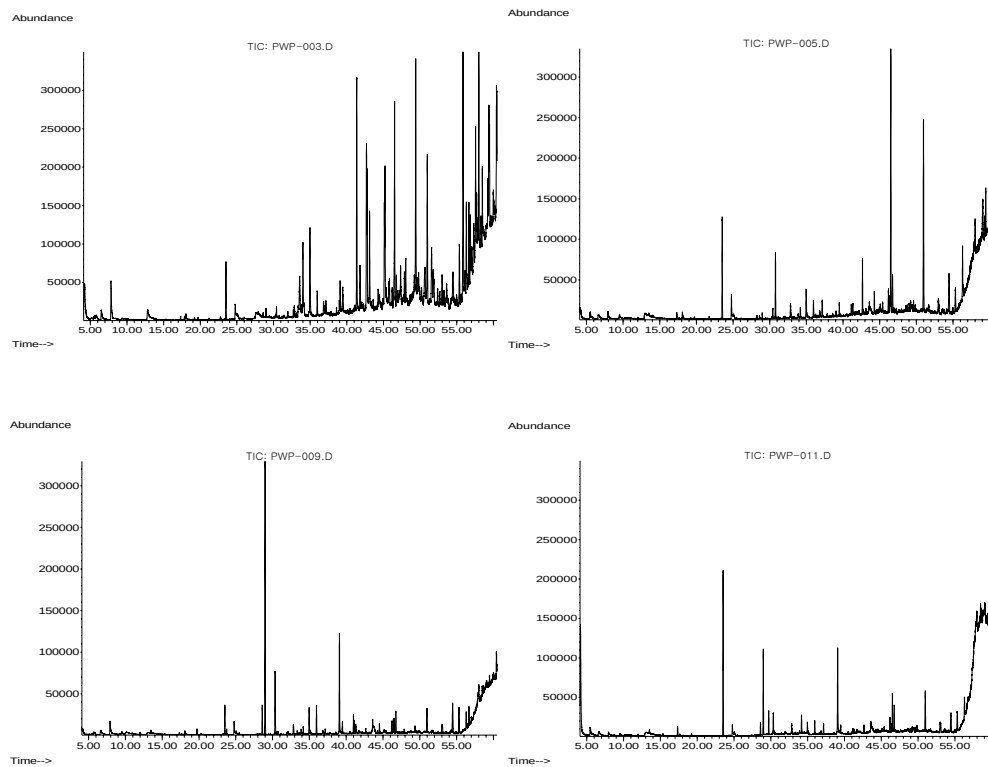
구 분	Toluene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			Xylene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	종이벽지	실크벽지	초배벽지	종이벽지	실크벽지	초배벽지
최대	30.782	47.433	76.469	7.829	19.218	4.042
최소	0.749	0.260	0.360	0.087	0.000	0.071
평균	6.323	6.024	16.208	1.119	1.546	1.168

(그림 3.12)는 종이벽지와 실크벽지의 폼알데하이드 크로마토그램 샘플이다. X축은 분석 경과시간이며, Y축은 분석시간에 따른 검출된 물질의 양을 나타낸다. 폼알데하이드를 포함한 다른 알데하이드 오염물질은 종이벽지와 실크벽지에서 거의 검출되지 않은 것을 확인할 수 있다.



(그림 3.12) 종이벽지와 실크벽지의 HCHO 크로마토그램

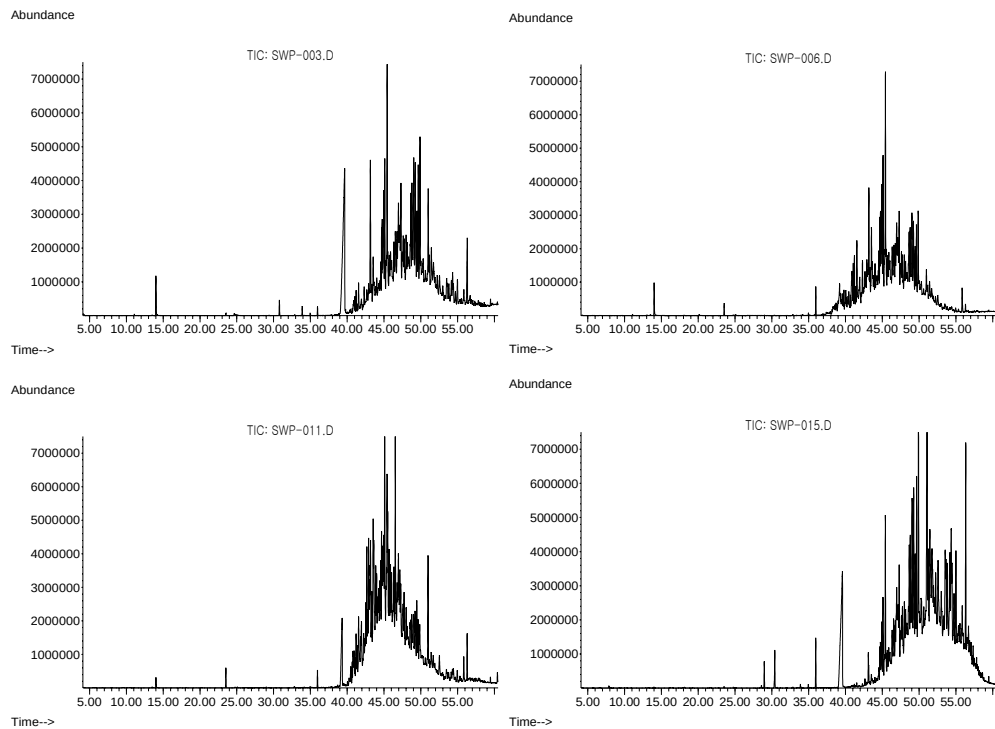
(그림 3.13)은 종이벽지 4개 제품의 TVOC 크로마토그램 샘플이다. X축은 분석 경과시간이며, Y축은 분석시간에 따른 검출된 물질의 양을 나타낸다. 크로마토그램에서 보는바와 같이 종이벽지에서 다양한 VOCs가 검출되고 있음을 알 수 있으며, 제품의 종류에 따라 검출되는 물질과 양이 서로 달라 패턴이 다양하게 나타난다.



(그림 3.13) 종이벽지의 TVOC 크로마토그램

(그림 3.14)는 실크벽지 4제품의 TVOC 크로마토그램 샘플이다. 실크벽지는 R.T 39분 이후에서 수많은 VOCs가 나타나고 있으며, 이 물질들 중에는 공동주택 측정대상 6종 VOCs에 포함되는 물질은 없는 것으로 나타났다. 그러나 피크의 크기³⁰⁾가 종이벽지와 비교하여 현저히 크게 나타나, 실크벽지 TVOC 방출량의 대부분을 차지하고 있다.

30) Y축의 스케일 주의하여 비교, 종이벽지는 Y축 최대 스케일이 300,000이며, 실크벽지는 7,000,000이다.



(그림 3.14) 실크벽지의 TVOC 크로마토그램

시험에 사용된 제품의 소비자가격을 조사한 결과, 종이벽지의 면적(m^2)당 평균 가격은 903원이고, 실크벽지의 평균가격은 2207원으로 실크벽지가 약 2.44배 비싼 것으로 나타났다. 따라서, 실크벽지를 사용할 경우, 비용을 더 들이면서 오염된 실내 공기를 마시게 되는 결과가 된다. 그러나 제품의 가격과 폼알데하이드 및 TVOC 방출강도와의 상관관계는 나타나지 않았다.

3.2.2 접착제 시험 결과 분석

한국계면활성제·접착제공업협동조합에 등록된 접착제 생산업체는 약 120개 업체이며, 우리나라 통계청 자료(2003년 기준)에 의하면³¹⁾ 접착제 제조업체의 수는 천연접착제 제조업체수는 65개, 합성수지 접착제 제조업체의 수는 198개에 이른다. 그러나 이 중 약 80%는 영세업체로서 현재 관리가 미흡한 실정이다. 국내 접착제 업체에서 생산되는 접착제의 종류는 3,100여종으로 추정되며, 건축용 접착제는 1,000여종에 이르고, 이 중 실내에 사용 가능한 접착제는 약 700여종 이상이다.

접착제의 종류는 구성 성분에 따라 무기계 접착제와 유기계 접착제로 분류할 수 있으며, 유기질은 천연수지계와 합성수지계로 나눌 수 있다. 또한, 접착제는 아니지만 넓은 의미에서 실란트 등의 실(Seal)재도 접착제에 포함된다. 실란트 등의 주 용도는 홈을 메우는 충전제로 사용되지만 접착의 성능도 있으며, 접착제 제조업체에서 동시에 생산되어지는 실내에 노출면이 많은 건축자재 중 하나이다.

접착제를 성분과 용도에 따라 분류하면 <표 3.12>와 같다.

<표 3.12> 접착제의 분류

대분류		중분류	비 고
건 축 내부용 (가구용 포함)	수지계	녹말계	녹말, 텍스트린 등
		단백질계	아교, 카세인등
		고무계	스티렌계, 라텍스, 고무폴등
		수지계	송진, 셀락 열경화성수지, 열가소성수지계등
		혼합계	페놀계, 에폭시계 등
	기 타	실란트	부틸계, 초산계 등
		코킹제	-
		빠 데	접착용 빠데
건 축 외부용		시멘트, 아스팔트, 세라믹 등	무기계 접착제, 구조용
비건축용		섬유용, 전자용, 선박용등	핫멜트, 순간접착제 포함

31) http://kosis.nso.go.kr/cgi-bin/sws_999.cgi

본 연구에서는 접착제를 건축공사 용도별로 재분류하고 이에 따라 총 32종의 제품을 선정하여 시험을 하였다. <표 3.13>에 시험한 접착제의 폼알데하이드 및 TVOC 방출강도와 함께 제품의 주성분³²⁾을 나타내었다.

<표 3.13> 접착제 용도별 HCHO 및 TVOC 방출강도

구 분		HCHO (㎍/㎡·h)		TVOC (㎍/㎡·h)		주 성분	세 부 용도	
		방출 강도	등급	방출 강도	등급			
벽지용	WB-001	0.001	최우수	0.007	최우수	전분, 소맥분	일반도배풀	
	WB-002	0.011	최우수	0.008	최우수			
	WB-003	0.001	최우수	0.002	최우수	PVAc Emulsion	목재, 미장합판, 마루판, 종이 일반벽지용	
	WB-004	0.006	최우수	0.002	최우수			
	WB-005	0.003	최우수	0.355	우수	PVAc	종이,벽지등 지류접착, 미장합판, 무늬목 등 목공용	
목재용	BWI-001	0.061	우수	0.143	최우수	EVA copolymer	목가구용 인테리어용 건축용	
	BWI-002	0.001	최우수	0.081	최우수	PVAc		목가구, 건축용일반용&특수제품
	BWI-003	0.057	최우수	0.425	우수		PUR	
	BWI-004	0.160	양호	0.845	양호	PIB		목가구, 건축용 봉제완구, 플라스틱 접착
	BWI-005	0.001	최우수	11.040	등급외		목가구용 인테리어용 공업용 건축용일반용&특수제품	
	BWI-006	0.043	최우수	12.746	등급외			
	BWI-007	0.047	최우수	19.429	등급외			
	BWI-008	0.043	최우수	10.259	등급외			
	BWI-009	0.038	최우수	12.373	등급외			
	BWI-010	0.011	최우수	0.019	최우수	Urea, Formaline	일반 목가공용	
	BWI-011	0.108	양호	0.087	최우수	Urea, Formaline	합판용, 일반 목가공용	
	BWI-012	0.162	양호	0.019	최우수	PVAc Emulsion	일반 목공용, 각종 미장합판, 목재 접착	
	BWI-013	0.000	최우수	0.430	우수	PVAc Emulsion	각종 목재 접착용	
PVC 접착용	BPV-001	0.006	최우수	0.353	우수	PUR계 2액형	연질 PVC, Hard board등	
	BPV-002	0.001	최우수	0.885	양호			
	BPV-003	0.005	최우수	0.319	우수	PVC	PVC제질 및 각종플라스틱등 다용도 접착	
타일 접착용	BT-001	0.001	최우수	0.780	양호	Acrylic Emusion 공중합체	PVC타일 및 중보행 MAT접착제	
	BT-002	0.060	최우수	17.681	등급외	Acryl	PVC타일 접착제	
	BT-003	0.024	최우수	22.024	등급외	Acrylic Emusion	도자기, 석기질	
	BT-004	0.008	최우수	15.399	등급외	변성 Acryl	도자기, GLASS, 각종 경질 PLASTIC, 고무 등의 접착	
바닥용 (마루)	BWF-001	0.007	최우수	1.336	양호	Urethane	온돌마루용접착제	
	BWF-002	0.006	최우수	0.063	최우수	Epoxy Resin		
	BWF-003	0.002	최우수	0.067	최우수			
	BWF-004	0.001	최우수	0.047	최우수	Waterborne Epoxy Resin		
	BWF-005	0.001	최우수	0.077	최우수			
바닥용 (륨)	BLF-001	0.011	최우수	0.685	양호	Acryl	경보행PVC바닥재	
	BLF-002	0.001	최우수	0.020	최우수	PVAc	PVC 경보행 률용 접착제	

32) 시험한 제품 라벨 또는 해당 제품회사의 홈페이지에 표시된 성분을 기준으로 작성하였다. 주성분이 불확실한 제품은 분석 대상에서 제외하였으며, 별도 첨가물은 고려하지 않았다.

도배시공에 가장 많은 양이 사용되는 제품은 전분 및 소맥분을 주성분으로 하는 도배풀이다. 이외에 벽지의 모서리 부분이나 벽면의 마감이 고르지 못한 부분 등의 접착에는 PVAc(PolyVinylACetate ; 초산비닐) 계통의 접착제를 혼합하여 사용하기도 한다. 시중에서 가장 많이 사용하고 있는 2개 제품의 도배풀을 선정하여 시험한 결과, 폼알데하이드와 TVOC 방출강도가 매우 낮게 나타났다. 접착력 강화를 위해 도배풀에 첨가하여 사용하는 PVAc계통의 접착제의 경우, 폼알데하이드 방출강도는 모든 제품에서 낮게 나타났으며, TVOC 방출강도 또한, 1개 제품만 우수 등급이고, 나머지 제품은 모두 최우수로 낮게 나타났다.

목재용 접착제는 목재의 접착부위 또는 요구되는 접착 강도에 따라 매우 다양한 제품이 있다. 합판의 접착이나 큰 강도를 요구하지 않는 곳은 Urea Resin, PVAc(PolyVinylACetate ; 초산비닐), EVA(Ethylene Vinyl Acetate) 등을 주성분으로 하는 제품을 사용하고, 강한 접착을 요구하는 부위는 PVC(PolyVinylChloride ; 염화비닐), PIB(PolyIsoButylene ; 합성고무), PUR(PolyURethane ; 폴리우레탄) 등을 주성분으로 하는 제품을 사용한다. 폼알데하이드 방출강도는 시험한 제품 중 3개 제품이 양호, 1개 제품이 우수, 나머지 제품은 최우수로 대체로 낮게 나타났다. TVOC 방출강도는 주성분에 따라 차이가 크게 나타났다. 특히, PIB를 주성분으로 하는 모든 제품은 다중이용시설등의 실내공기질관리법에서 사용을 금지하는 $10\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 를 초과하였다.

PVC 접착제는 시험한 제품의 주성분은 PUR계 2액형 또는 PVC였으며, 폼알데하이드 방출강도가 낮은 것으로 나타났다. TVOC 방출강도는 목재용 접착제에서 주성분이 PVC Resin으로 만들어진 제품이 $10.259\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 로 나타난 것에 비해, PVC 접착제는 $0.319\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 으로 차이가 현저하게 나타났다. 따라서, 같은 주성분일 경우에도 제품의 용도와 추가되는 첨가제에 따라 다른 방출특성을 보이는 것으로 예상된다.

타일용 접착제의 경우, 폼알데하이드 방출강도는 낮게 나타났으나, TVOC 방출강도는 다른 어떤 제품의 접착제보다도 높게 나타났다. 주성분은 아크릴 계통으로 5개 제품 중 도기질 타일 접착제의 방출강도가 가장 높게 나타났다. 특히, 도기질 타일 접착제는 무거운 타일이 벽면에 시공된 후 위에서 내리 누르는 타일의 전단력을 견뎌야 하기 때문에, 다른 접착제에 비해 더욱 강한 접착력을 요구한다.

바닥판 접착제는 크게 온돌마루용과 모노륨 등과 같은 경보행용 바닥접착제로 나눌 수 있다. 온돌마루용 접착제는 시험한 5개 제품 모두 폼알데하이드 방출강

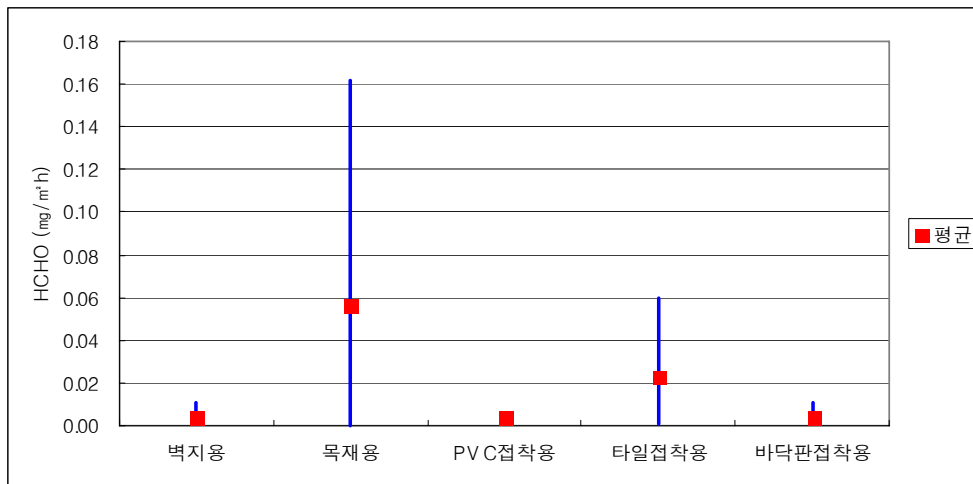
도가 대체로 낮게 나타났다. 특히, TVOC 방출강도는 주성분이 Epoxy인 제품은 매우 낮았으나, 주성분이 Urethane인 제품은 다소 높은 방출강도를 나타내고 있다. 온돌마루용 접착제 제작 업체에 따르면, Epoxy로 제작되는 제품의 경우 Urethane으로 제작되는 제품에 비해 kg당 약 1000원 이상의 추가 비용이 발생하는 것으로 확인되었다. 그러나 바닥판은 실내공간에서 벽지 다음으로 많은 면적을 차지하고, 그에 따라 많은 양의 접착제를 사용하기 때문에, 제품 선택시 신중을 기하여야 할 것으로 판단된다.

루름 접착제는 폼알데하이드 방출강도가 매우 낮았으나, Acryl이 주성분인 제품에서 TVOC 방출강도가 다소 높게 나타났다.

<표 3.14>와 (그림 3.15)는 시험한 접착제의 폼알데하이드 방출강도 최대, 최소, 평균값을 나타낸 것이다. 목재용 접착제가 가장 큰 편차와 함께, 가장 높은 방출강도를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 타일용 접착제 또한, 상당히 높은 폼알데하이드 방출강도를 나타내고 있다. 이에 비해 벽지용과 PVC접착용 그리고 바닥판 접착용은 방출강도가 대체로 낮게 나타났다. 폼알데하이드 방출강도는 목재용 > 타일접착용 > PVC접착용 > 벽지접착용 > PVC 및 바닥판 접착용 순으로 낮게 나타났다.

<표 3.14> 접착제 용도별 HCHO 방출강도 비교

구 분 (mg/m ² · h)		벽지용	목재용	PVC 접착용	타일 접착용	바닥판 접착용
HCHO	최대	0.011	0.162	0.006	0.060	0.011
	최소	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001
	평균	0.005	0.056	0.004	0.023	0.004

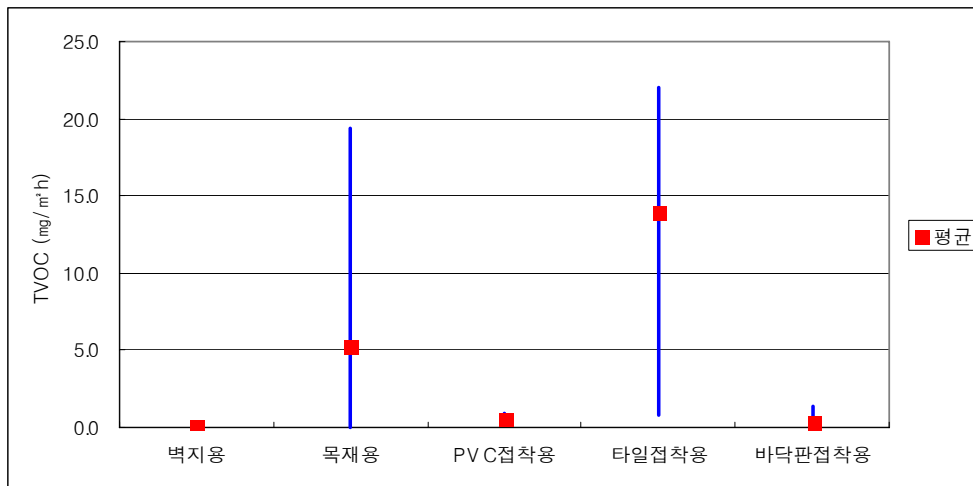


(그림 3.15) 접착제 용도별 HCHO 방출강도 비교

<표 3.15>와 (그림 3.16)은 시험한 접착제의 TVOC 방출강도 최대, 최소, 평균 값을 나타낸 것이다. 타일 접착제가 가장 큰 편차와 함께, 가장 높은 방출강도를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 목재용 또한, 거의 비슷한 수준인 것으로 나타났다. TVOC 또한, 벽지용과 PVC접착용 그리고 바닥판 접착용의 방출강도는 대체로 낮은 것으로 나타났다. TVOC 방출강도는 타일접착용 > 목재용 > PVC접착용 > 바닥판접착용 > 벽지접착용 순으로 낮게 나타났다.

<표 3.15> 접착제 용도별 TVOC 방출강도 비교

구 분 (mg/m ² · h)		벽지용	목재용	PVC 접착용	타일 접착용	바닥판 접착용
TVOC	최대	0.355	19.429	0.885	22.024	1.336
	최소	0.002	0.019	0.319	0.780	0.020
	평균	0.075	5.223	0.519	13.971	0.328



(그림 3.16) 접착제 용도별 TVOC 방출강도 비교

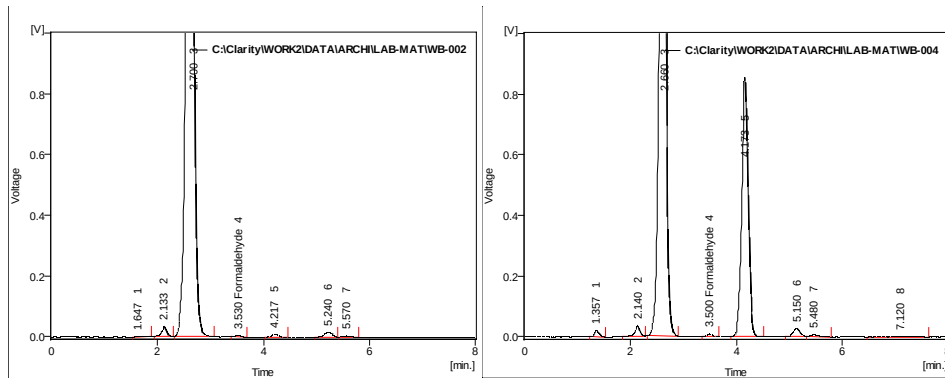
<표 3.16>은 시험한 접착제의 6종 VOCs 방출량을 나타낸 것으로, 모든 제품에서 1,4-Dichlorobenzene은 검출되지 않았다. 특히, 목재용 접착제 중 PIB(PolyIsoButylene ; 합성고무)를 주성분인 제품에서 Toluene의 방출량이 매우 크게 나타났으며, Etylbenzene, Xylene의 방출량 또한, 크게 나타났다.

(그림 3.17)은 벽지용 접착제 2개 제품의 폼알데하이드 크로마토그램이다. 벽지용 접착제의 경우, 시험한 5개 제품 모두 최우수 등급 수준으로 나타났지만, 그림의 오른쪽 WB-004 제품에서 무색의 휘발성이 강한 액체로 자극적인 냄새가 나는 Acetaldehyde가 다량 검출되었다. Acetaldehyde는 현재 다중이용시설등의 실내공기질관리법 상의 측정 항목은 아니지만 인체에 해로운 독성 물질의 하나로 향후 측정대상 항목이 될 가능성이 있는 물질이다.

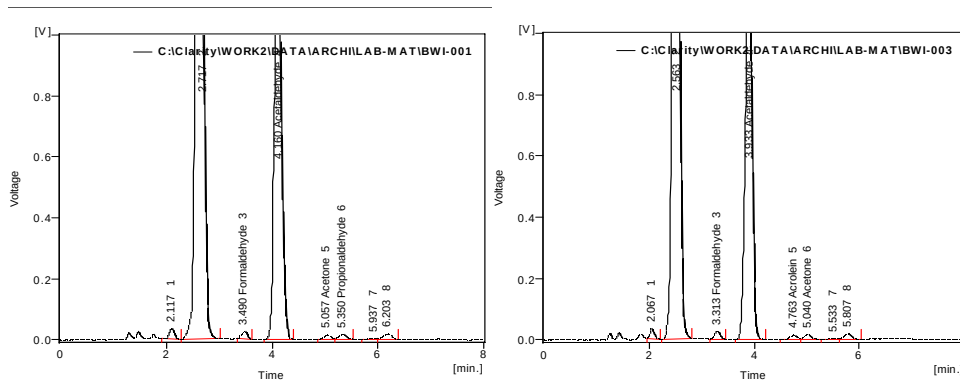
(그림 3.18)은 목재용 접착제 중 Acetaldehyde가 검출된 2개 제품의 폼알데하이드 크로마토그램이다. 각각 주성분은 EVA와 PVAc로 나타났다.

<표 3.16> 접착제 용도별 6종 VOCs 방출량

구 분		6종 VOCs 방출량 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
		Benzene	Toluene	Etylbenzene	Xylene	Stylene	1,4-Dichlorobenzene
벽지용	WB-001	0.000	0.342	0.000	1.158	0.000	0.000
	WB-002	0.000	0.307	0.000	0.080	0.000	0.000
	WB-003	0.000	1.020	0.000	0.513	0.000	0.000
	WB-004	0.000	0.282	0.000	0.000	0.000	0.000
	WB-005	7.000	28.000	5.000	6.000	5.000	0.000
목재용	BWI-001	0.000	16.084	0.000	1.400	0.000	0.000
	BWI-002	0.000	1.276	0.000	0.344	0.000	0.000
	BWI-003	0.000	8.551	0.533	1.193	0.207	0.000
	BWI-004	0.000	226.647	1.202	2.538	0.000	0.000
	BWI-005	0.000	2782.849	4.033	6.342	13.651	0.000
	BWI-006	0.000	2612.227	113.131	354.798	0.000	0.000
	BWI-007	0.244	4426.669	285.127	652.538	0.000	0.000
	BWI-008	7.171	456.058	20.667	20.291	0.829	0.000
	BWI-009	0.000	2184.944	120.740	344.180	0.000	0.000
	BWI-010	0.000	3.803	0.000	0.000	0.000	0.000
	BWI-011	0.702	22.616	3.122	3.656	1.927	0.000
	BWI-012	3.896	26.964	1.828	2.648	0.000	0.000
	BWI-013	6.000	111.000	11.000	11.000	8.000	0.000
PVC 접착용	BPV-001	4.000	55.000	9.000	9.000	7.000	0.000
	BPV-002	5.000	76.000	9.000	10.000	7.000	0.000
	BPV-003	0.000	46.000	0.000	0.000	0.000	0.000
타일 접착용	BT-001	0.000	2.376	0.000	0.500	0.236	0.000
	BT-002	0.000	1736.313	4.138	2.771	0.000	0.000
	BT-003	0.113	1.704	49.369	0.000	51.140	0.000
	BT-004	4.000	4.000	0.000	3.000	0.000	0.000
바닥용 (마루)	BWF-001	0.000	3.778	170.449	276.700	0.000	0.000
	BWF-002	0.000	2.489	5.216	3.331	0.000	0.000
	BWF-003	0.000	3.776	0.000	0.138	0.000	0.000
	BWF-004	0.000	4.838	5.873	10.658	0.000	0.000
	BWF-005	0.000	3.989	0.567	1.120	0.000	0.000
바닥용 (틈)	BLF-001	0.000	41.282	0.000	0.147	0.000	0.000
	BLF-002	0.000	3.476	0.493	1.093	0.000	0.000



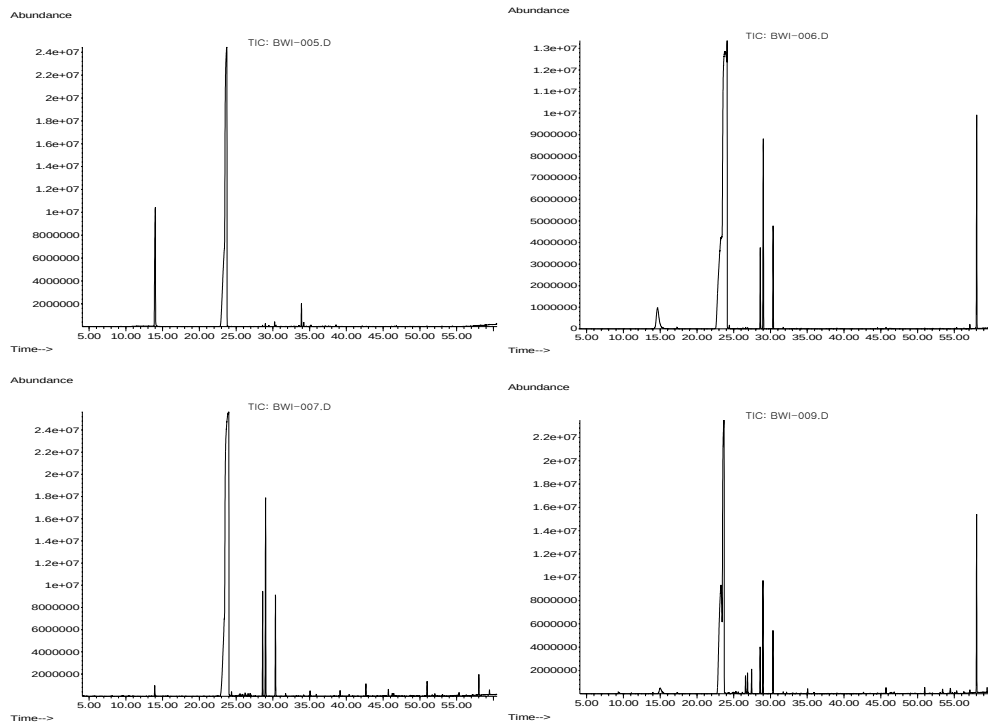
(그림 3.17) 벽지용 접착제의 HCHO 크로마토그램



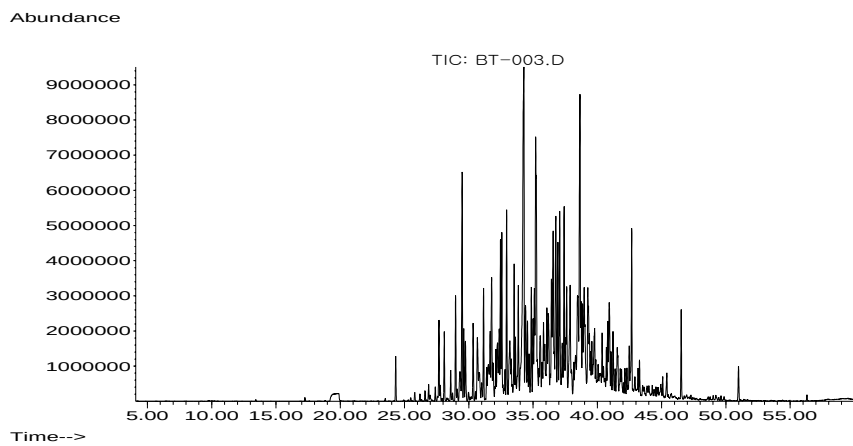
(그림 3.18) 목재용 접착제 중 Acetaldehyde가 검출된 제품의 HCHO 크로마토그램

(그림 3.19)는 본 연구에서 시험한 제품 중에서 친환경건축자재 품질인증에서 등급외로 나타난 PIB를 주성분으로 하는 4개 제품의 TVOC 크로마토그램이다. 그림에서 R.T 23.5분에 나타나는 Toluene의 피크가 다른 물질들의 피크에 비해 현저히 큰 것을 알 수 있다. 특히, PIB를 주성분으로 하는 접착제에서 나타나는 Toluene 피크는 다른 제품에서 나타나는 Toluene 피크에 비해 매우 두꺼우며, 피크의 봉우리가 갈라지는 현상이 나타나는 것으로 확인되었다.

(그림 3.20)은 본 연구에서 시험한 접착제 중 가장 높은 방출강도를 나타낸 도기질 타일접착제의 크로마토그램을 나타낸 것이다. 실크벽지와 패턴은 유사하나, 실크벽지는 R.T 39분에서부터 수많은 VOCs가 나타나고 있는 반면, 타일접착제는 R.T 25.5분에서 51분까지 다량의 VOCs가 나타나고 있다.



(그림 3.19) PIB가 주성분인 목공용 접착제의 TVOC 크로마토그램



(그림 3.20) 주방 및 욕실 타일 접착제의 TVOC 크로마토그램

3.2.3 바닥재 시험 결과 분석

바닥재는 벽지 다음으로 공동주택 실 표면을 많이 차지하는 재료이다. 바닥재는 벽이나 천장과는 달리 우리나라 난방방식의 특성상 바닥 난방에 적합한 열전도가 좋은 자재가 사용되고 있다. 대표적으로 종이장판 등과 같이 시공하기가 편하고, 열전도율이 비교적 좋으며 경제적으로도 저렴한 자재를 주로 사용해왔으나, 화학기술의 발전과 입식문화의 보급으로 PVC 립 및 나무마루재 바닥재가 많이 보급되고 있다.

종이바닥재 및 PVC바닥재는 벽지제조 업체에서 주로 같이 생산하고 있으며, 최근 웰빙(well-being)문화에 힘입어 천연소재를 원료로 가공되는 바닥재들도 많이 제조되고 있다. 나무를 재료로 하는 마루재인 경우 재료의 특성상 주로 수입에 의존하기 때문에 수입품 대리점과 영세업체들이 많이 있어서 정확한 업체수를 파악하기는 아직 미흡하나 국내 약 42개 제조업체와 약 228개의 제품이 있는 것으로 파악된다.

본 연구에서는 이 중 온돌마루 5개 제품과 립바닥재 3개 제품을 시험하였다. <표 3.17>은 바닥재 종류별 폼알데하이드와 TVOC 방출강도 그리고 6종 VOCs 방출량을 정리한 것이다. 폼알데하이드의 경우, 온돌마루 방출강도는 낮은 제품에서부터 다소 높은 제품에까지 차이가 나타난 반면, 립바닥재 방출강도는 대체로 낮게 나타났다. TVOC의 경우, 온돌마루는 1개 제품을 제외한 4개 제품이 최우수 등급의 낮은 방출강도를 나타냈으며, 립바닥재는 온돌마루바닥재에 비하여 방출강도가 다소 높게 나타났다. 특히, PVC Sheet 립바닥재는 천연재료 립바닥재보다 방출강도가 다소 높게 나타났다.

<표 3.17> 바닥재 종류별 HCHO, TVOC 방출강도 및 6종 VOCs 방출량

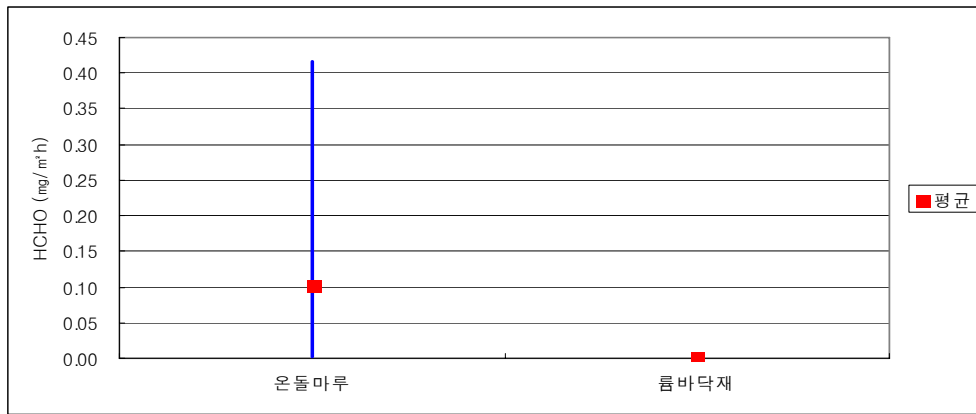
구 분		HCHO (mg/m ³ · h)		TVOC (mg/m ³ · h)		6종 VOCs 방출량 (μg/m ³)					주 재료
		방출 강도	등급	방출 강도	등급	Benzene	Toluene	Etylben zene	Xylene	Stylene	
온돌 마루	WF-001	0.010	최우수	0.327	양호	0.000	9.682	2.020	3.582	0.553	나무
	WF-002	0.078	양호	0.080	최우수	0.000	29.740	30.827	28.200	3.013	
	WF-003	0.417	일반1	0.100	최우수	0.000	92.231	6.969	3.558	1.631	
	WF-004	0.001	최우수	0.009	최우수	0.000	1.978	0.398	0.607	0.000	
	WF-005	0.007	최우수	0.096	최우수	0.582	31.362	23.140	35.951	0.000	
榻榻미	RF-001	0.004	최우수	0.270	양호	0.000	53.973	0.000	0.651	0.000	천연재료
	RF-002	0.001	최우수	1.609	일반1	0.200	27.200	80.400	109.500	1.100	PVC Sheet
	RF-003	0.002	최우수	0.585	일반1	0.900	286.000	36.600	105.400	0.600	

6종 VOCs 중에서 온돌마루와榻榻미 바닥재 모두 1,4-Dichlorobenzene은 검출되지 않았으며, Benzene과 Stylene은 매우 소량이 검출되었다. 온돌마루는 Toluene, Etylbenzene, Xylene의 방출량이 제품 간 다소 편차가 나타났으며,榻榻미 바닥재는 PVC Sheet에서 Toluene, Etylbenzene, Xylene이 다소 많이 검출되었다.

<표 3.18>과 (그림 3.21)은 온돌마루바닥재와榻榻미 바닥재의 폼알데하이드 방출강도를 비교한 것으로 온돌마루바닥재는 1개 제품에서 폼알데하이드 방출강도가 높게 나타나 시험한 제품 간에 편차가 크게 나타났고,榻榻미 바닥재에서 폼알데하이드 방출강도가 대체로 낮게 나타났다. 폼알데하이드 방출강도는 온돌마루 >榻榻미 바닥재 순으로 낮게 나타났다.

<표 3.18> 온돌마루바닥재와榻榻미 바닥재의 HCHO 방출강도 비교

구 분 (mg/m ³ · h)		온돌마루	榻榻미
HCHO	최대	0.417	0.004
	최소	0.001	0.001
	평균	0.103	0.002

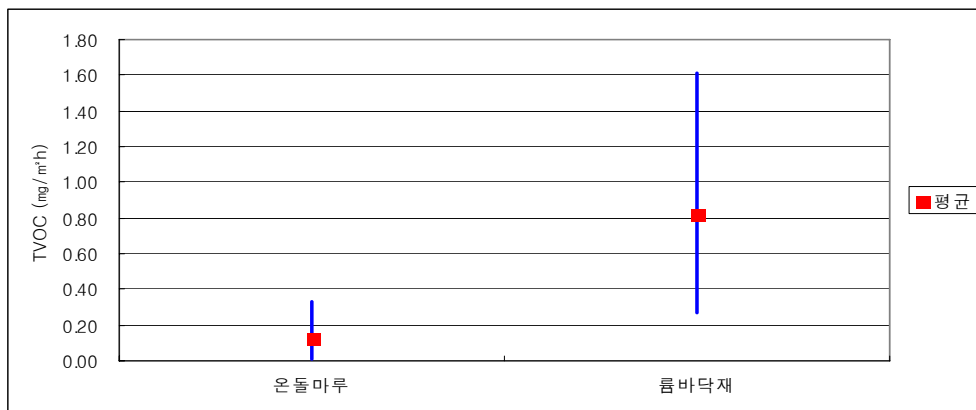


(그림 3.21) 온돌마루바닥재와 립바닥재의 HCHO 방출강도 비교

<표 3.19>와 (그림 3.22)는 온돌마루바닥재와 립바닥재의 TVOC 방출강도를 비교한 것으로 온돌마루바닥재보다 립바닥재 방출강도가 높은 것으로 나타났다. TVOC 방출강도는 립바닥재 > 온돌마루 순으로 낮게 나타났다.

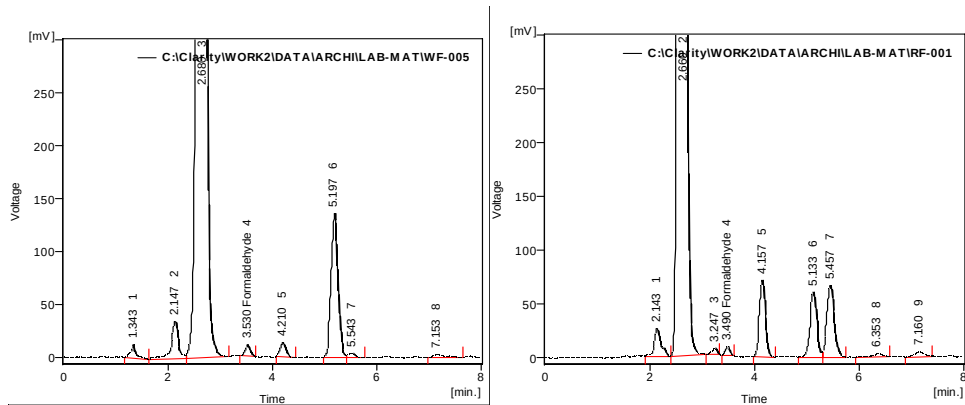
<표 3.19> 온돌마루바닥재와 립바닥재의 TVOC 방출강도 비교

구 분 (mg/m³ · h)		온돌마루	립바닥재
TVOC	최대	0.327	1.609
	최소	0.009	0.270
	평균	0.122	0.821



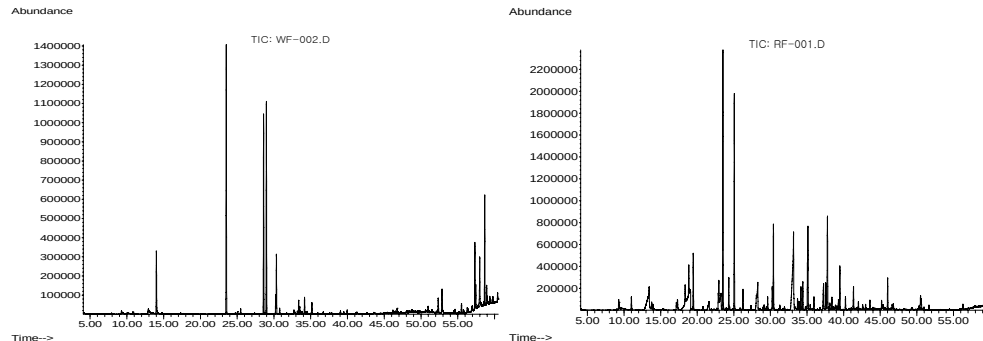
(그림 3.22) 온돌마루바닥재와 립바닥재의 TVOC 방출강도 비교

(그림 3.23)은 온돌마루바닥재와 립바닥재(천연재료)의 폼알데하이드 크로마토그램을 비교한 것으로 온돌마루바닥재에서 폼알데하이드와 같은 알데하이드 계통인 Acetone이 다량 검출되었다.



(그림 3.23) 온돌마루바닥재와 립바닥재의 HCHO 크로마토그램비교

(그림 3.24)는 온돌마루바닥재와 립바닥재(천연재료)의 TVOC 크로마토그램을 비교한 것으로 온돌마루바닥재에서 주로 Toluene, Etylbenzene, Xylene 등의 물질이 검출되었으며, 립바닥재는 이 물질 외에 분자량이 큰 물질이 다량 검출되고 있는 것으로 나타났다.



(그림 3.24) 온돌마루바닥재와 립바닥재의 TVOC 크로마토그램비교

3.2.4 기타 건축자재 시험 결과

<표 3.20>은 앞 절의 분류에 포함되지 않지만, 건축공사에 중요하게 사용되는 몇 가지 제품들을 기타 건축자재로 분류·시험하여 폼알데하이드 및 TVOC 분석 결과를 나타낸 것이다.

폼알데하이드는 시험한 모든 제품에서 방출강도가 대체로 낮게 나타났다. TVOC 방출강도는 접착제의 결과와 유사한 결과가 나타났는데, PUR과 Latex(합성고무)가 주성분인 제품에서 방출강도가 높게 나타났고, PVAc가 주성분인 제품은 낮게 나타났다.

충진재는 일반적으로 실리콘 코킹을 말하며, 특이한 것은 SC-001 제품의 경우, 변형 아크릴이 주성분이나 TVOC 방출강도가 우수 등급으로 대체로 낮게 나타났다. 이는 앞 절에서 전술한 바와 같이 같은 성분이라도 사용하는 용도와 첨가되는 물질이 서로 다르기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

방수액³³⁾은 욕실 타일 시공 전에 벽과 바닥에 시공 되는 것으로 주성분이 PUR과 PIB이며, 시험한 2개 제품 모두 등급 외로 방출강도가 매우 높게 나타났다.

코팅재는 시멘트, 석고보드 등의 표면에 바르는 제품으로 방출강도가 대체로 낮게 나타났으나, WBinder³⁴⁾ 제품의 경우, 방출강도가 다소 높게 나타났다.

필름지는 MDF 등에 나무무늬 등의 효과를 연출하는데 사용하는 제품으로 1개 제품을 시험하였으며, TVOC 방출강도가 다소 높게 나타났다.

벽체의 재료는 레미탈과 석고보드를 대상으로 하였다. 이 중 레미탈은 일반 시멘트와는 달리 작업의 편의를 위하여 모래와 시멘트가 혼합된 상태로 유통되는 제품으로, 벽이나 바닥 마감에 사용된다. TVOC 방출강도는 레미탈은 최우수, 석고보드는 우수로 대체로 방출강도가 낮게 나타났다.

33) 방수액은 페인트 등급을 적용하였다

34) 석고보드 이음면에는 퍼터를 발라 이음이 보이지 않도록 하는데, 퍼터가 건조하게 되면 표면에 가루가 발생하여 이후 도배공사시 벽지가 벽에 붙지 않게 된다. 이 제품은 석고 가루를 표면에 고정하는 역할을 한다.

<표 3.20> 기타 건축자재의 HCHO 및 TVOC 방출강도

구 분		HCHO (mg/m ³ · h)		TVOC (mg/m ³ · h)		주성분	용 도
		방출 강도	등급	방출 강도	등급		
접착제	BE-001	0.001	최우수	0.025	최우수	변성 PVAc	콘크리트, 석고보드 밤라이트 등의 접착
	BE-002	0.019	최우수	2.093	일반1	PUR	주방 싱크대 접착.
	BE-003	0.003	최우수	8.735	일반2	PUR	목재와 철판등의 접착
	BE-004	0.013	최우수	2.638	일반1	합성고무 LATEX	인테리어 필름접착용 일반용&특수제품
충진재	SC-001	0.006	최우수	0.339	우수	변형 Acrylic resin	목재,바닥재의 이음새, 벽면과 마루의 틈새 충진
	SC-002	0.008	최우수	16.995	등급외	실리콘수지	곰팡이 및 박테리아 서식이 발생하는 곳
방수액	WP-001	0.011	최우수	17.370	등급외	PUR	자동차용 공업용 건축용 방수
	WP-002	0.049	우수	5.011	등급외	PIB	방수
코팅제	WC-001	0.013	최우수	0.011	최우수	온 콜로이드 용액	시멘트 벽돌 코팅
	WC-002	0.011	최우수	0.136	우수	숫, 바인더	시멘트코팅
	WC-003	0.004	최우수	0.189	우수	숫, 바인더	시멘트코팅
	WC-004	0.024	최우수	0.051	최우수	석고	크랙 메움용
	WPBinder	0.029	최우수	1.050	일반1	-	고정액
필름지	IF-001	0.007	최우수	0.772	일반1	PVC필름	바닥용
벽체	WAL-001	0.002	최우수	0.005	최우수	시멘트, 모래	미장용
	WAL-002	0.005	최우수	0.173	우수	석고, 종이	벽체
타일	WT-001	0.006	최우수	0.062	최우수	도기	주방, 욕실벽

<표 3.21>는 기타 건축자재의 6종 VOCs 방출량을 나타낸 것이다. 이 중 접착제인 BE-003 제품에서 다른 모든 제품에서 검출되지 않았던 1,4-Dichlorobenzene이 검출되었으나, 매우 미량으로 나타났다. 방수액은 Etylbenzene, Xylene이 다량 검출되었다.

<표 3.21> 기타 건축자재의 6종 VOCs 방출량

구 분		6종 VOCs 방출량 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
		Benzene	Toluene	Etylbenzene	Xylene	Stylene	1,4-Dichloro benzene
접착제	BE-001	1.127	9.098	0.000	2.720	0.000	0.000
	BE-002	0.000	13.447	0.000	1.202	0.000	0.000
	BE-003	0.000	625.462	1.098	2.533	0.000	1.456
	BE-004	0.000	18.487	0.556	0.933	0.000	0.000
충진재	SC-001	0.000	2.182	0.000	7.716	0.000	0.000
	SC-002	0.347	53.958	6.031	34.513	0.000	0.000
방수액	WP-001	0.667	46.271	1579.493	2198.656	0.000	0.000
	WP-002	0.000	4.918	237.818	1076.696	0.000	0.000
코팅재	WC-001	0.000	0.902	0.000	0.396	0.000	0.000
	WC-002	0.000	7.200	0.000	0.720	0.000	0.000
	WC-003	0.000	1.658	0.487	1.140	0.000	0.000
	WC-004	0.000	0.267	0.704	0.653	0.000	0.000
	WPBinder	0.000	3.627	26.680	19.404	227.658	0.000
필름지	IF-001	0.000	405.104	7.756	17.527	0.000	0.000
벽체	WAL-001	0.000	1.818	0.000	0.693	0.000	0.000
	WAL-002	0.000	1.773	0.000	0.804	0.000	0.000
타일	WT-001	0.000	25.907	0.000	0.629	0.000	0.000

3.3 소 결

국내에서 생산되는 주요 건축자재 100종을 대상으로 친환경 건축자재 단체품질인증 시험방법에 맞게 설계·제작된 소형챔버를 이용하여 용도별, 성분별로 분류·시험하여 건축자재에서 방출되는 실내공기오염물질의 방출강도와 특성을 파악하였다.

- 1) 벽지는 14개 업체에서 생산하는 종이벽지 12종, 실크벽지 26종, 초배벽지 5종, 총 43종을 대상으로 시험하였다. 시험결과, 폼알데하이드 평균 방출강도는 실크벽지($0.006\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 초배벽지($0.005\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 종이벽지($0.004\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) 순으로 낮게 나타났으며, 시험대상 벽지 모두가 한국공기청정협회 친환경 건축자재 단체품질 인증등급 중 최우수 등급에 해당하는 낮은 방출강도로 나타났다. TVOC 방출강도는 실크벽지($2.552\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 종이벽지($0.065\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 초배벽지($0.034\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) 순으로 낮게 나타났으며, 이 중 실크벽지에서 다중이용시설등의실내공기질관리법에서 사용을 금지하고 있는 TVOC 방출강도 $4\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 이상이 26개 제품 중에서 5건이 나타났다.
- 2) 접착제는 건축시공 용도에 따라 재분류하여 총 32종의 제품을 시험하였다. 폼알데하이드 방출강도는 목재용($0.056\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 타일접착용($0.023\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 벽지접착용($0.005\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > PVC 및 바닥판 접착용($0.004\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) 순으로 낮게 나타났다. 시험한 32개 제품 중 28개 제품은 한국공기청정협회 친환경 건축자재 단체품질 인증등급 중 최우수로 나타났고, 1개 제품은 우수, 나머지 3개 제품은 양호 등급으로 대체로 낮은 방출강도를 보였다. TVOC 방출강도는 타일접착용($13.971\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 목재용($5.223\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > PVC접착용($0.519\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 바닥판접착용($0.328\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 벽지접착용($0.075\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) 순으로 낮게 나타났다. 특히, Acryl을 주성분으로 하는 타일접착용 4개 제품 중 3개 제품이 다중이용시설등의실내공기질관리법에서 사용을 금지하는 TVOC 방출강도 $10\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 를 초과하는 것으로 나타났고, PIB를 주성분으로 목재접착용은 5개 제품 모두 TVOC 방출강도 $10\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 를 초과하는 것으로 나타났다.
- 3) 바닥재는 온돌마루 5개 제품과 PVC Sheet 립바닥재 3개 제품을 시험하였다. 폼알데하이드 방출강도는 온돌마루($0.103\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 립바닥재($0.002\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

순으로 낮게 나타났으며, TVOC 방출강도는 림바닥재($0.821\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 온돌마루($0.122\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) 순으로 낮게 나타났다.

- 4) 건축공사에 사용되는 몇 가지 제품들을 기타건축자재로 분류하여 시험한 결과, 폼알데하이드 방출강도는 모든 제품이 대체로 낮게 나타났으며, TVOC 방출강도는 제품의 주성분에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

이상의 시험 결과, TVOC 방출강도는 친환경 건축자재 인증등급 내에 고르게 분포되어 있고, 건축자재간에 차이를 나타내어 특성 구분이 용이하였다. 그러나 폼알데하이드 방출강도는 등급기준 중 최우수에 집중되어 있어 건축자재의 특성 파악이 용이하지 않는 것으로 나타났다. 이는 현재 국내의 폼알데하이드 방출강도 등급이 외국의 기준과 비교하여 전반적으로 낮게 설정 되어있기 때문으로, 국내 건축자재의 폼알데하이드 방출에 대한 과소평가가 우려된다. 따라서, 향후 국내 건축자재의 특성과 인체 위해성을 함께 고려한 폼알데하이드 등급 개선이 요구된다.

본 시험은 건축자재 성상에 따라 사용량이 동일하게 적용되었고 사용용도에 관계없이 표면이 노출된 상태로 시험하였기 때문에, 건축자재마다 사용량과 노출 표면적이 다른 실제 공동주택에서 실내공기오염의 원인이 되는 건축자재를 판별하는 데에는 다소 어려움이 있다. 따라서, 본 연구결과는 건축재료 간의 오염물질 방출강도와 특성의 상호 비교를 위한 자료로 활용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

제 4 장 건축자재 마감구성에 따른 방출강도 분석

본 장은 실제 공동주택 시공이 여러 건축자재들의 조합으로 이루어짐에 따라, 다양한 건축자재로 구성된 벽과 바닥과 같은 건축부위의 오염물질 방출특성은 개별 건축자재와 비교하여 다소 다르게 나타날 것으로 예상되어 실시한 것이다. 따라서, 공동주택에서 실내에 면하는 비율이 높은 벽과 바닥 등을 실제 시공과 동일하게 마감구성재를 제작하고 소형챔버를 이용하여 방출강도를 실험하였다. 이를 통하여 마감구성재의 방출강도와 특성 그리고 시간 경과에 따른 방출강도 변화를 분석하였고, 마감구성재를 이루는 건축자재 중 실내공기에 큰 영향을 미치는 주요 건축자재를 파악하였다.

4.1 마감구성재 방출강도 실험 개요

건축자재에서 방출되는 실내공기오염물질은 공동주택의 공간을 이루는 벽, 바닥, 천장 등의 건축부위와 실내에서 사용하는 각종 가구와 집기들에서 방출되어 복합적인 형태로 실내공기 중에 나타난다. 이러한 건축부위와 실내 집기들은 단일 제품이 아닌 여러 제품들의 조합으로 구성되는데, 예를 들어, 벽체를 구성하는 재료는 콘크리트, 도배풀, 도배지 그리고 필요한 경우 석고보드와 초배벽지가 순서에 따라 구성된다. 따라서, 실내로 노출되어 있는 도배지와는 달리 콘크리트, 석고보드, 도배풀 등에서 방출되는 오염물질은 상대적으로 그 영향력이 크지 않을 수 있다. 그러나 건축자재 방출강도 시험의 경우, 모든 제품이 실내로 노출된 것으로 가정하여 시험하기 때문에, 이러한 상황은 반영되지 않는다.

따라서, 본 연구에서는 공동주택의 공간을 구성하는 주요 건축부위를 실제 시공 조건과 동일하게 마감구성재를 제작하여 실내공기오염물질 방출실험을 실시하였다. 공동주택의 건축부위는 벽과 바닥을 대상으로 하였으며, 천장은 벽과 동일하게 구성되므로 실험 대상에서 제외하였다. 각 벽과 바닥의 마감구성재는 3장의 시험결과에서 TVOC 방출강도³⁵⁾가 낮게 나타난 건축자재와 높게 나타난 건축자재를 선정하였다. 이와 함께 공동주택의 주방과 욕실에서 비교적 많은 면적을 차지하는 타일벽을 함께 실험하였다. 각각의 마감구성재는 이후 5장의 Mock-Up 실험실과 6장의 원룸아파트에 적용하였다. 마감구성재 실험에 사용된

35) 3장의 시험결과, 폼알데하이드 방출강도는 모두 낮게 나타났으므로 건축자재 선정 기준은 TVOC 방출강도만을 대상으로 하였다.

건축자재는 <표 4.1>에 정리하였다.

<표 4.1> 마감구성재에 사용된 건축자재

마감구성재	적용 건축자재	제품라벨	HCHO (mg/m ² · h)		TVOC (mg/m ² · h)	
			방출강도	등급	방출강도	등급
마감-A	레미탈	WAL-001	0.002	최우수	0.005	최우수
	석고보드	WAL-002	0.005	최우수	0.173	우수
	도배폴	WB-002	0.011	최우수	0.008	최우수
	숯초배벽지	FWP-003	0.007	최우수	0.001	최우수
	종이벽지	PWP-012	0.003	최우수	0.102	우수
마감-B	레미탈	WAL-001	0.002	최우수	0.005	최우수
	석고보드	WAL-002	0.005	최우수	0.173	우수
	바인더	WPBinder	0.029	최우수	1.050	일반1
	도배폴	WB-002	0.011	최우수	0.008	최우수
	일반초배벽지	FWP-005	0.002	최우수	0.004	최우수
	실크벽지	SWP-011	0.002	최우수	4.726	등급외
마감-C	레미탈	WAL-001	0.002	최우수	0.005	최우수
	석고보드	WAL-002	0.005	최우수	0.173	우수
	타일본드	BT-003	0.024	최우수	22.024	등급외
	타일	WT-001	0.006	최우수	0.062	최우수
마감-D	레미탈	WAL-001	0.002	최우수	0.005	최우수
	온돌마루접착제	BWF-002	0.006	최우수	0.063	최우수
	온돌마루	WF-005	0.007	최우수	0.096	최우수
마감-E	레미탈	WAL-001	0.002	최우수	0.005	최우수
	접착제	BWI-006	0.043	최우수	12.746	등급외
	룸바닥재	RF-001	0.004	최우수	0.270	양호

마감-A는 3장에서 시험한 벽지 중 TVOC 방출강도가 낮은 종이벽지로 제작하였다. 종이벽지는 디자인과 색상을 고려하여 TVOC 방출강도가 가장 낮은 제품을 선정하여 시공할 예정이었으나, 시험에 사용된 제품이 생산 중단된 관계로 동일업체의 같은 모델명³⁶⁾을 가진 제품으로 제작하였다. 시공 전에 종이벽지를 재측정한 결과, 초기에 선정한 제품보다 다소 높은 방출강도를 나타내었으나, 최우수에 가까운 우수등급의 방출강도로 실험 조건에 큰 변수로 작용하지 않을 것으로 판단되어 그대로 적용하였다. 초배벽지는 친환경 소재로 알려진 참숯을 바른 초배벽지를 적용하였다. 이외 실제 벽과 동일하게 구성하기 위하여 도배폴, 석고

36) 벽지의 경우, 같은 모델이라 하더라도 Pattern No 또는 Item No에 따라 디자인과 색상의 차이가 크다.

보드, 레미탈(콘크리트 벽체)등을 적용하였다.

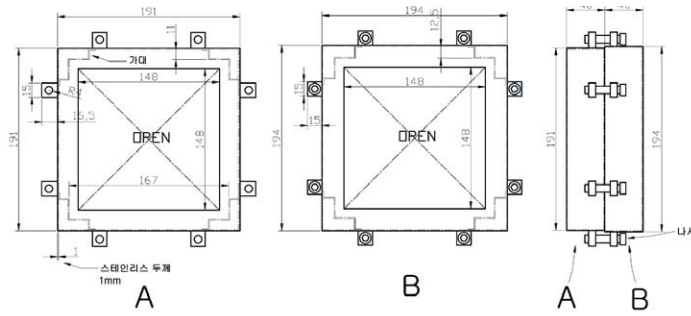
마감-B는 3장에서 시험한 벽지 중 TVOC 방출강도가 높은 실크벽지로 제작하였다. 이 중 방출강도가 등급외이며, 전형적인 실크벽지 TVOC 크로마토그램 패턴을 보이는 제품을 선정하였다. 초배벽지는 일반 초배벽지를 적용하였으며, 벽지와 석고보드 벽면의 부착을 강하게 하는 바인더를 추가로 시공하였다. 도배풀, 석고보드, 레미탈(콘크리트 벽체)등은 마감-A와 동일한 제품을 적용하였다.

마감-C는 3장에서 시험한 Acryl계 타일 접착제를 사용한 건식방법으로 제작하였다. 최근의 공동주택 공사는 공기를 단축하기 위하여 습식 방법에서 건식방법으로 옮겨가고 있는 추세이다. 타일 시공 또한, 시멘트 몰탈을 이용한 습식 방법에서, 시공의 편의를 위해서 접착제를 이용한 건식 방법으로 교체되고 있으며, 석고보드 벽으로 이루어지는 주방 타일은 모두 건식방법으로 시공되고 있다. 특히, 석고보드로 마감된 벽면은 석고보드가 물을 흡수하는 성질이 강하기 때문에, 습식으로 시공할 경우, 곰팡이가 발생하고 벽 자체가 약해질 수 있기 때문에 건식방법 이외의 대안이 없는 실정이다.

마감-D는 3장에서 시험한 온돌마루바닥재 중 비교적 폼알데하이드와 TVOC 방출강도가 낮게 나타난 제품으로 제작하였으며, 온돌마루접착제는 3장의 시험결과에서 TVOC 방출강도가 낮은 Epoxy를 주성분으로 하는 제품을 선정하였다.

마감-E는 고급 립바닥재로 제작하였다. 마감-E에 사용한 립바닥재는 천연재료로 만든 제품으로 자체 TVOC 방출강도는 높지 않으나, 일반 립바닥재와 달리 시공시 PIB(PolyIsoButylene; 합성고무)를 주성분으로 하는 접착제를 사용하며, 비교적 고급거실과 사무실에 적용되는 제품이다.

마감구성재 방출강도 실험은 3장에서 사용한 친환경건축자재 단체품질인증 시험방법인 소형챔버를 이용하였다. 마감구성재 노출면은 시험법의 판, 판넬, 보드 형태와, 롤형태의 시료부하율인 2.0으로 맞추었다. 이를 위하여 165 × 165 mm 크기의 소형 거푸집을 제작하였고, 레미탈을 이용하여 콘크리트 시편을 제작하였다. 콘크리트는 너무 얇게 제작할 경우 부서질 수 있으므로 약 5cm 이상의 두께로 하였으며, 콘크리트를 충분히 양생시킨 후, 각각의 재료를 그 위에 시공하였다. 이때 콘크리트 시편의 두께로 인하여 소형챔버의 용적이 상대적으로 작아지는 것을 고려하여, 각 건축자재는 콘크리트의 양면에 시공되도록 (그림 4.1)과 같은 시료고정틀을 제작하였다. 시료고정틀의 재질은 오염물질의 점착을 최소화하기 위하여 스테인리스로 제작하였다. 시료부하율에 맞게 양면으로 노출될 수 있도록 하였으며, 볼트를 이용하여 시료의 두께에 따라 조절이 가능하도록 하였다.



(그림 4.1) 마감구성재 시료고정틀

(그림 4.2)에서 (그림 4.6)은 종이벽지, 실크벽지, 타일벽, 온돌마루, 립바닥재가 시공된 마감구성재 시료와 시료고정틀에 설치한 모습이다. 완성된 마감구성재 시료들은 소형챔버에 설치하여 시간간격을 두고 20일 동안 측정·분석하였다.



(그림 4.2) 마감-A 시료 및 고정



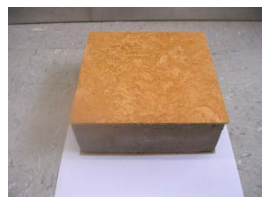
(그림 4.3) 마감-B 시료 및 고정



(그림 4.4) 마감-C 시료 및 고정



(그림 4.5) 마감-D 시료 및 고정



(그림 4.6) 마감-E 시료 및 고정



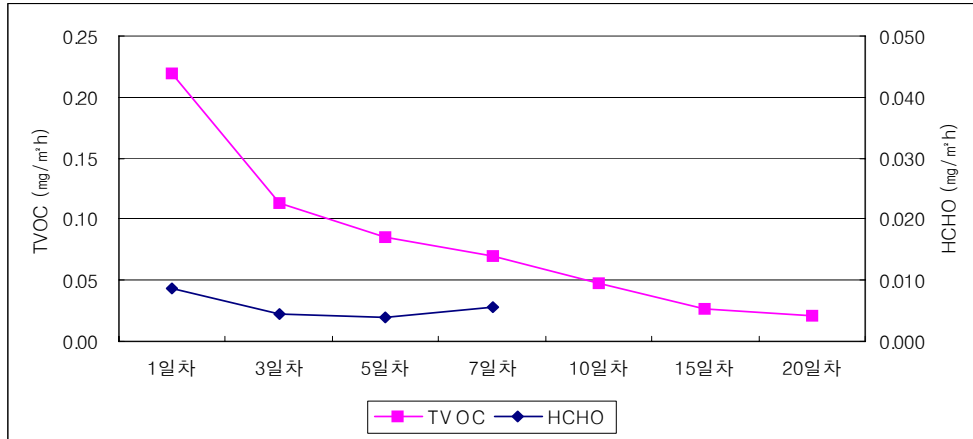
4.2 마감구성재 실험결과 분석

<표 4.2>는 1일에서 20일 경과까지 시간간격에 따른 마감구성재의 폼알데하이드와 TVOC 방출강도 그리고 6종 VOCs 방출량 결과이다.

<표 4.2> 마감구성재 실내공기오염물질 방출강도 실험결과

구분	시간 경과	HCHO (mg/m ³ · h)	TVOC (mg/m ³ · h)	6종 VOCs 방출량 (μg/m ³)				
				Benzene	Toluene	Etylbenz ene	Xylene	Stylene
마감-A	1일차	0.009	0.219	0.000	170.138	2.711	4.280	1.364
	3일차	0.004	0.113	0.000	82.293	1.340	2.313	0.520
	5일차	0.004	0.085	0.000	55.676	0.964	1.769	0.353
	7일차	0.006	0.069	0.000	46.984	0.884	1.671	0.318
	10일차		0.048	0.000	32.771	0.638	1.291	0.244
	15일차		0.026	0.000	19.165	0.000	0.829	0.000
	20일차		0.020	0.000	14.831	0.000	0.767	0.000
마감-B	1일차	0.003	11.331	0.000	183.124	30.918	28.133	241.751
	3일차	0.001	5.485	0.000	54.040	5.191	5.767	25.424
	5일차	0.004	3.581	0.000	27.347	3.169	4.656	9.791
	7일차	0.002	2.464	0.000	13.080	1.849	2.936	6.289
	10일차		1.485	0.000	6.369	1.002	1.929	3.809
	15일차		0.724	0.000	2.598	0.398	1.007	2.058
	20일차		0.467	0.000	1.860	0.000	0.713	1.489
마감-C	1일차	0.022	22.805	0.000	132.402	736.600	1767.580	50.027
	3일차	0.041	16.585	0.000	31.860	387.058	1080.442	0.000
	5일차	0.044	14.709	0.000	11.256	233.380	771.133	0.000
	7일차	0.046	12.452	0.000	5.849	134.920	555.116	0.000
	10일차	0.039	11.035	0.000	1.767	54.607	312.938	0.000
	15일차	0.037	8.572	0.000	1.060	11.653	105.967	0.000
	20일차		6.638	0.000	0.858	3.427	40.171	0.000
마감-D	1일차	0.015	0.183	1.124	141.544	34.167	46.098	0.000
	3일차	0.024	0.127	0.609	87.267	29.322	39.393	0.000
	5일차	0.011	0.099	0.471	62.604	23.693	32.329	0.000
	7일차	0.011	0.088	0.436	52.660	20.980	28.973	0.000
	10일차		0.082	0.000	39.242	17.678	25.013	0.000
	15일차		0.050	0.000	25.533	12.960	18.591	0.000
	20일차		0.049	0.000	24.233	11.382	16.624	0.000
마감-E	1일차	0.002	3.829	0.000	3013.982	218.111	571.629	0.000
	3일차	0.005	3.366	0.000	2880.216	214.182	570.791	0.000
	5일차	0.004	2.886	0.000	2310.376	206.082	554.924	0.000
	7일차	0.004	3.088	0.000	2449.142	193.911	531.820	0.000
	10일차		2.541	0.000	2734.307	172.471	483.764	0.000
	15일차		2.335	0.000	2463.369	139.274	409.468	0.000
	20일차		2.193	0.000	2619.544	122.960	376.047	0.000

(그림 4.7)은 종이벽지로 시공된 마감-A의 폼알데하이드 및 TVOC 방출강도 실험결과이다. 마감-A의 폼알데하이드는 방출되는 양이 매우 적어 1일차에서 7일차까지 4차례만 측정하였다.



(그림 4.7) 마감-A의 방출강도 실험결과

폼알데하이드 방출강도는 1일차에서 0.009mg/m³·h³⁷⁾로 나타났으며, 이후 감소하여 7일차에는 0.006mg/m³·h로 더욱 낮아졌다. 이는 3장의 결과에서 마감-A를 구성하는 모든 건축자재의 폼알데하이드 방출강도가 낮게 나타난 결과와 일치한다.

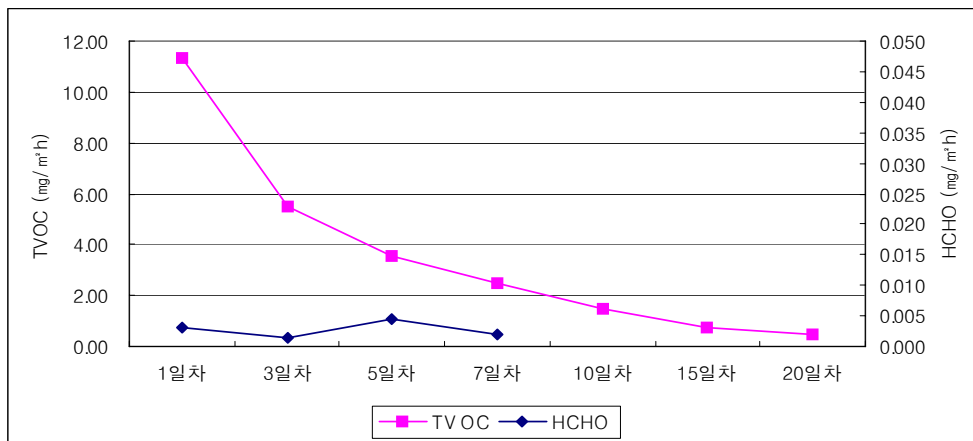
TVOC 방출강도는 1일차에는 0.219mg/m³·h, 3일차에는 0.113mg/m³·h, 20일차에는 0.020mg/m³·h로 시간이 경과함에 따라 방출강도가 크게 감소하였으며, 방출강도도 매우 낮았다. 마감-A에 사용한 종이벽지는 7일이 경과된 후 0.102mg/m³·h로 나타난데 반해, 마감-A는 7일 경과 후 0.069mg/m³·h로 현저히 낮게 나타났다. 이는 시공과정 중에 도배풀 등의 사용으로 종이벽지의 방출특성이 다소 변화하여 건조됨과 동시에 조기에 오염물질을 방출한 것으로 추정된다. 시간경과에 따른 TVOC 크로마토그램 변화는 부록 (그림 1)에 나타내었다.

마감-A는 레미탈, 석고보드, 도배풀, 숯초배벽지, 종이벽지의 순서로 제작되었다. 각각의 크로마토그램과 마감-A 3일차와 7일차 크로마토그램을 비교한 결과, 레미탈, 석고보드, 도배풀, 그리고 숯초배벽지의 영향은 나타나지 않았다. 그러나 종이벽지에서 나타나는 오염물질과 마감-A에서 나타나는 오염물질의 피크는 크

37) 이 수치는 친환경건축자재 단체품질 인증등급 중 최우수에 해당함.

기 차이는 다소 있으나 거의 정확하게 일치한다. 따라서, 마감-A를 구성하는 건축자재 중에서 최종적으로 마감된 종이벽지가 실내공기에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 마감-A와 이를 구성하는 건축자재의 크로마토그램 비교는 부록 (그림 6)³⁸⁾에 나타내었다.

(그림 4.8)은 실크벽지로 시공된 마감-B의 폼알데하이드 및 TVOC 방출강도 실험결과이다. 마감-B의 폼알데하이드는 방출되는 양이 매우 적어 1일차에서 7일차까지 4차례만 측정하였다.



(그림 4.8) 마감-B의 방출강도 실험결과

폼알데하이드 방출강도는 1일차에서 $0.003\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 나타났으며, 이후 감소하여 7일차에는 $0.002\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 더욱 낮아져, 마감-A보다도 다소 낮게 검출되었다. 이는 3장의 결과에서 마감-B를 구성하는 모든 건축자재의 폼알데하이드 방출강도가 낮게 나타난 결과와 일치한다.

TVOC 방출강도는 1일차에는 $11.331\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$, 3일차에는 $5.485\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 마감-A의 1일차와 3일차와 비교하여 각각 51배, 48배 이상 높게 나타났다. 그러나 시간이 경과함에 따라 방출강도가 크게 감소하여, 20일차에는 $0.467\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 나타나 마감-A 보다 약 23배가 높은 방출강도를 나타내었다. 시간경과에 따른

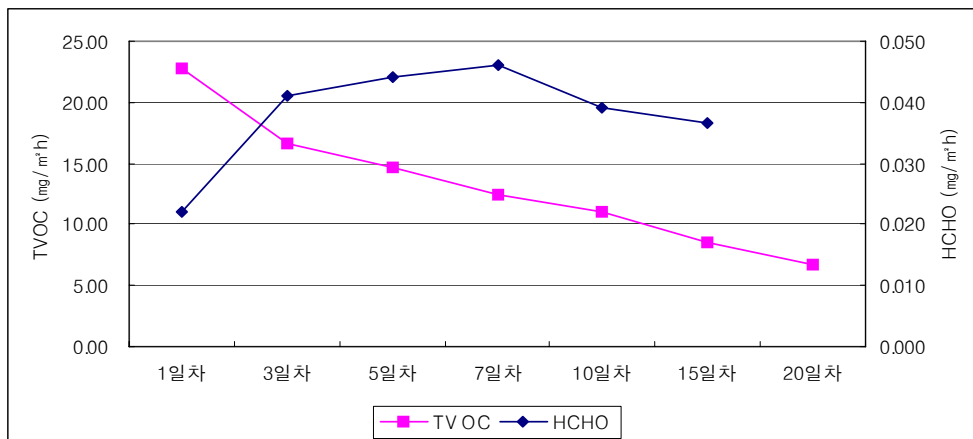
38) 친환경 건축자재 단체품질 인증 시험방법 중 액상은 3일, 판, 판넬 또는 보드, 롤형태의 제품은 7일을 시험하므로 동일 시간을 비교 가능하도록 하였으며, Y축의 스케일을 모두 동일하게 하였다.

TVOC 크로마토그램 변화는 부록 (그림 2)에 나타내었다.

크로마토그램을 분석한 결과, 39.266min에 나타나는 2-ethyl-Hexanoic acid는 1일차에서부터 20일차까지 큰 감소 없이 지속적으로 검출되었다. 이 물질은 외기와 시험장치의 필터를 통과한 챔버 백그라운드에서 검출되지 않았으며, 따라서, 실크벽지 자체에서 발생한 물질로 판단된다. 또한, 3장에서 시험한 실크벽지 26종 중 2종(SWP-013, SWP-017)을 제외한 모든 건축자재에서 피크 크기는 차이가 있었으나 공통적으로 검출되고 있는 것을 확인하였다. 이는 실크벽지의 특징인 것으로 판단되며, 오랜 시간 동안 쉽게 사라지지 않을 것으로 예상된다.

마감-B는 레미탈, 석고보드, 바인더, 도배풀, 일반초배벽지, 실크벽지의 순서로 제작되었다. 3일차와 7일차 크로마토그램과 비교하여 레미탈, 도배풀, 그리고 일반초배벽지의 영향은 나타나지 않았으며, 바인더에 의한 영향 또한, 매우 적었다. 그러나 마감-B와 실크벽지에서 나타나는 피크가 정확하게 일치하고 있는 것으로 나타나, 마감-B를 구성하는 건축자재 중에서 최종적으로 마감된 실크벽지가 실내공기에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 마감-B와 이를 구성하는 건축자재의 크로마토그램 비교는 부록 (그림 7)에 나타내었다.

(그림 4.9)는 주방 및 욕실 타일벽 마감-C의 폼알데하이드 및 TVOC 방출강도 실험결과이다. 마감-C의 폼알데하이드는 마감-A와 마감-B보다 다소 많아 1일차에서 15일차까지 6차례 측정하였다.



(그림 4.9) 마감-C의 방출강도 실험결과

폼알데하이드 방출강도는 1일차에서 $0.022\text{mg/m}^3 \cdot \text{h}$ 로 나타났으며, 이후 증가하

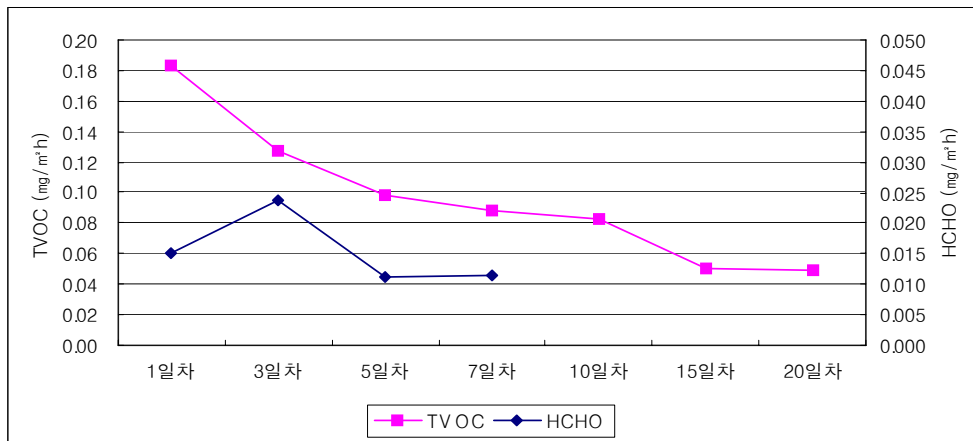
여 3일차에는 $0.041\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, 15일차에는 $0.037\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 로 일정하게 유지되었다. 3장의 결과에서 타일접착제 방출강도가 $0.024\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 로 나타난 것과 비교하여 다소 높게 나타났는데, 이는 마감-C에 사용된 접착제의 양이 건축자재시험에 사용된 양보다 월등히 많이 사용되었기 때문인 것으로 판단된다.

TVOC 방출강도는 1일차에는 $22.805\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, 3일차에는 $16.585\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 로 종이벽지로 구성된 마감-A와 비교하여 각각 104배, 147배 이상, 실크벽지로 구성된 마감-B와 비교하여 각각 2배, 3배 이상으로 시험한 마감구성재 중 가장 높게 나타났다. 최종 20일차에는 $6.638\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 로 상당히 많은 양이 감소하였으나, 마감-A와 비교하여 약 330배, 마감-B와 비교하여 약 14배가 높게 나타나 시간경과에 따른 감소율 또한, 마감-A와 마감-B와 비교하여 매우 낮은 것으로 판단된다.

크로마토그램을 분석한 결과, 초기 1일차에서 Toluene뿐만 아니라, R.T 약 25분부터 51분까지 수많은 VOCs가 나타났다. 최종 20일차의 크로마토그램을 보면, 1일차와 비교하여 상당히 많은 양이 줄어들었으나, 여전히 수많은 VOCs가 나타나고 있다. 시간경과에 따른 TVOC 크로마토그램 변화는 부록 (그림 3)에 나타내었다.

마감-C는 레미탈, 석고보드, 타일접착제, 타일의 순서로 제작되었다. 3일차와 7일차 크로마토그램과 비교하여 레미탈, 석고보드, 타일의 영향은 나타나지 않았으며, 타일접착제에서 나타나는 피크의 패턴과 마감-C에서 나타나는 패턴이 정확하게 일치하는 것으로 나타나, 타일과 타일 틈 사이로 타일접착제 오염물질이 방출되고 있음을 확인하였다. 그러나 3장의 타일접착제 방출시험 결과와 비교하여 마감-C의 피크가 현저히 크게 나타났는데, 이는 건축자재 방출강도 시험의 경우, 시료부하율 0.4에 맞도록 매우 소량을 도포하여 시험한 것에 비하여, 마감-C는 실제 시공에 사용되는 양을 사용하였기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 폼알데하이드 결과와 같이 재료의 사용량이 많아지면 오염물질 방출량도 상대적으로 많아지는 것을 확인하였다. 마감-C와 이를 구성하는 건축자재의 크로마토그램 비교는 부록 (그림 8)에 나타내었다.

(그림 4.10)은 온돌마루로 시공된 마감-D의 폼알데하이드 및 TVOC 방출강도 실험결과이다. 마감-D의 폼알데하이드는 방출되는 양이 매우 적어 1일차에서 7일차까지 4차례만 측정하였다.



(그림 4.10) 마감-D의 방출강도 실험결과

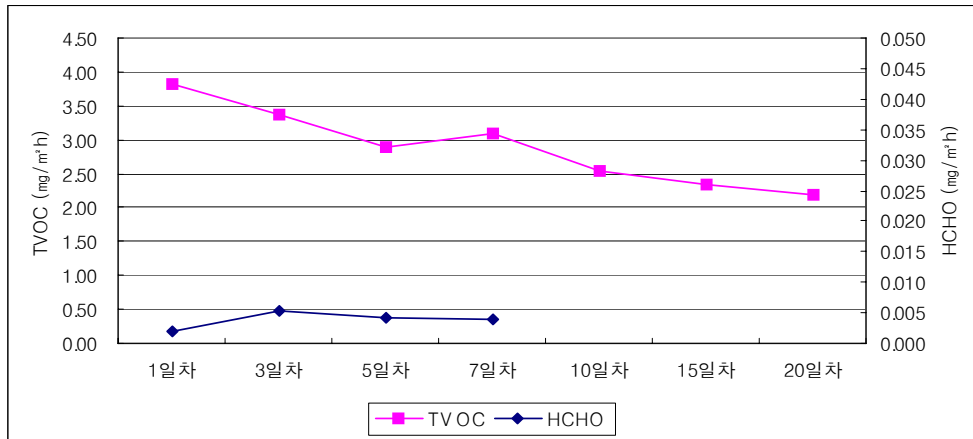
폼알데하이드 방출강도는 1일차에서 $0.015\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 나타났으며, 3일차에서 $0.024\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 다소 증가하였다가, 5일과 7일차에는 $0.011\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 일정하게 유지되었다. 이는 3장의 결과에서 마감-D를 구성하는 모든 건축자재의 폼알데하이드 방출강도가 낮게 나타난 결과와 일치한다. 또한, 크로마토그램 분석결과, 3장의 결과와 같이 마감-D는 폼알데하이드와 같은 알데하이드 계통인 Acetone이 다량 검출되었다.

TVOC 방출강도는 1일차에는 $0.183\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 시험한 5개 마감구성재 중 가장 낮게 나타났다. 그러나 3일차에는 $0.127\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$, 최종 20일차에는 $0.049\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 방출강도가 높게 나타나 마감-A와 비교하여 감소율이 완만한 것으로 나타났다. 시간경과에 따른 TVOC 크로마토그램 변화는 부록 (그림 4)에 나타내었다.

마감-D는 레미탈, 온돌마루접착제, 온돌마루의 순서로 제작되었다. 3일차와 7일차 크로마토그램과 비교하여 레미탈의 영향은 거의 나타나지 않았다. 그러나 크기는 다소 다르나 온돌마루에서 나타나는 피크의 패턴과 마감-D에서 나타나는 패턴이 정확하게 일치하고 있는 것을 볼 수 있으며, 온돌마루 접착제에서 방출되는 9.182min의 Isopropyl Alcohol이 마감-D에서도 검출되었다. 이는 온돌마루재 틈 사이로 접착제의 성분이 방출되었기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 마감-D를 구성하는 건축자재 중에서 최종적으로 마감된 온돌마루바닥재와 접착제 일부에서 방출하는 일부 성분이 실내공기에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 마감-D와 이를 구성하는 건축자재의 크로마토그램 비교는 부록 (그림 9)에 나타내었다.

(그림 4.11)은 림바닥재로 시공된 마감-E의 폼알데하이드 및 TVOC 방출강도

실험결과이다. 마감-E의 폼알데하이드는 방출되는 양이 매우 적어 1일차에서 7일차까지 4차례만 측정하였다.



(그림 4.11) 마감-E의 방출강도 실험결과

폼알데하이드 방출강도는 1일차에서 $0.002\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 나타났으며, 3일차에서 $0.005\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 다소 증가하였다가, 5일과 7일차에는 $0.004\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 일정하게 유지되었다. 이는 3장의 결과에서 마감-E를 구성하는 모든 건축자재의 폼알데하이드 방출강도가 낮게 나타난 결과와 일치한다. 크로마토그램을 분석한 결과, 3장의 결과와 같이 Acetaldehyde와 Acetone이 소량 검출되었다.

TVOC 방출강도는 1일차에는 $3.829\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$, 3일차에는 $3.366\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 같은 바닥재인 마감-D의 1일차와 3일차와 비교하여 각각 21배, 27배 이상 높게 나타났다. 최종 20일차에는 $2.193\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 로 시간이 경과함에 따라 방출강도가 감소하였으나, 마감-D 보다 약 45배가 높은 방출강도를 나타내어 온돌마루에 비해 방출강도 감소율이 매우 낮은 것으로 판단된다. 시간경과에 따른 TVOC 크로마토그램 변화는 부록 (그림 5)에 나타내었다.

마감-E는 레미탈, 접착제, 립바닥재의 순서로 제작되었다. 3일차와 7일차 크로마토그램과 비교하여 레미탈의 영향은 거의 나타나지 않았다. 그러나 접착제에서 나타나는 피크의 패턴과 마감-E에서 나타나는 패턴이 정확하게 일치하였으며, 립바닥재에서 나타나는 피크가 마감-E에서도 검출되고 있는 것을 확인하였다. 따라서, 마감-E를 구성하는 건축자재 중에서 접착제에서 방출되는 성분의 영향이 가장 크고 일부 립바닥재 성분이 실내공기에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

마감-E와 이를 구성하는 건축자재의 크로마토그램 비교는 부록 (그림 10)에 나타내었다.

폼알데하이드 방출강도는 7일차를 기준으로 마감-C > 마감-D > 마감-A > 마감-E > 마감-B 순으로 낮게 나타났으며, TVOC 방출강도는 20일차를 기준으로 마감-C > 마감-E > 마감-B > 마감-D > 마감-A 순으로 낮게 나타났다.

<표 4.3>은 각 마감구성재 TVOC 방출강도를 시간경과에 따른 감소율로 나타낸 것이다. 표에서 보는바와 같이 초기 1일차의 방출강도와 비교하여 최종 20일차에서 마감-A와 마감-B는 각각 0.09와 0.04로 현저하게 감소하는 반면, 마감-C와 마감-D는 각각 0.29와 0.27로 감소율이 다소 완만하게 나타났다. 마감-E의 감소율은 0.57로 실험한 마감구성재 중 가장 완만한 감소율을 나타내었다.

<표 4.3> 마감구성재 TVOC 방출강도 감소율

	마감-A	마감-B	마감-C	마감-D	마감-E
1일차	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3일차	0.52	0.48	0.73	0.69	0.88
5일차	0.39	0.32	0.64	0.54	0.75
7일차	0.32	0.22	0.55	0.48	0.81
10일차	0.22	0.13	0.48	0.45	0.66
15일차	0.12	0.06	0.38	0.27	0.61
20일차	0.09	0.04	0.29	0.27	0.57

4.3 마감구성재 방출강도 감소율

마감구성재의 시간경과에 따른 TVOC 방출강도 실험결과를 바탕으로 감소율 함수를 작성하였다. 감소율 함수는 Microsoft Excel 프로그램을 이용하여 <표 4.4>와 같이 선형함수, 로그함수, 이차다항함수, 거듭제곱함수, 지수함수 등 총 5가지로 작성하였다. <표 4.5>는 감소율 함수를 이용한 계산 결과와 실험결과를 비교한 것이며, <표 4.6>은 실험 이후 방출강도 감소량을 예측한 것이다.

<표 4.4> 마감구성재의 방출강도 감소율 함수

구 분	함수종류	감소율 함수	R ²
마감-A	선형	$y = -0.0083x + 0.1556$	0.6892
	로그	$y = -0.0655\ln(x) + 0.2014$	0.9654
	이차다항	$y = 0.0009x^2 - 0.0265x + 0.214$	0.9069
	거듭제곱	$y = 0.2612x^{-0.7907}$	0.9588
	지수	$y = 0.1752e^{-0.1183x}$	0.9453
마감-B	선형	$y = -0.449x + 7.5602$	0.6412
	로그	$y = -3.6251\ln(x) + 10.204$	0.9493
	이차다항	$y = 0.0533x^2 - 1.5666x + 11.144$	0.9051
	거듭제곱	$y = 15.419x^{-1.0689}$	0.9508
	지수	$y = 9.1305e^{-0.1617x}$	0.9590
마감-C	선형	$y = -0.6241x + 18.963$	0.8555
	로그	$y = -5.3628\ln(x) + 22.899$	0.9963
	이차다항	$y = 0.0326x^2 - 1.4617x + 22.119$	0.9541
	거듭제곱	$y = 26.511x^{-0.4394}$	0.9302
	지수	$y = 20.324e^{-0.0564x}$	0.9719
마감-D	선형	$y = -0.0061x + 0.1499$	0.7753
	로그	$y = -0.0454\ln(x) + 0.179$	0.9828
	이차다항	$y = 0.0005x^2 - 0.0168x + 0.1844$	0.9368
	거듭제곱	$y = 0.1994x^{-0.4516}$	0.9504
	지수	$y = 0.1569e^{-0.0663x}$	0.9021
마감-E	선형	$y = -0.0796x + 3.5849$	0.8525
	로그	$y = -0.5572\ln(x) + 3.8986$	0.9470
	이차다항	$y = 0.0048x^2 - 0.1804x + 3.908$	0.9430
	거듭제곱	$y = 3.9997x^{-0.1891}$	0.9269
	지수	$y = 3.6265e^{-0.028x}$	0.8957

y : 건축자재의 방출강도 (mg/m³ · h), x : 시간경과 (일)

<표 4.5> 방출강도 감소율 계산 결과와 실험결과 비교 (단위 : mg/m² · h)

경과 일수	함수종류	마감-A		마감-B		마감-C		마감-D		마감-E	
1 일차	선형	0.147	0.219	7.111	11.331	18.339	22.805	0.144	0.183	3.505	3.829
	로그	0.201		10.204		22.899		0.179		3.899	
	이차다항	0.188		9.631		20.690		0.168		3.732	
	거듭제곱	0.261		15.419		26.511		0.199		4.000	
	지수	0.133		6.292		17.849		0.171		3.400	
3 일차	선형	0.131	0.113	6.213	5.485	17.091	16.585	0.132	0.127	3.346	3.366
	로그	0.129		6.221		17.007		0.129		3.286	
	이차다항	0.143		6.924		18.027		0.139		3.410	
	거듭제곱	0.110		4.765		16.360		0.121		3.249	
	지수	0.077		2.988		13.766		0.126		2.989	
5 일차	선형	0.114	0.085	5.315	3.581	15.843	14.709	0.119	0.099	3.187	2.886
	로그	0.096		4.370		14.268		0.106		3.002	
	이차다항	0.104		4.644		15.626		0.113		3.126	
	거듭제곱	0.073		2.760		13.071		0.096		2.950	
	지수	0.045		1.419		10.617		0.093		2.627	
7 일차	선형	0.098	0.069	4.417	2.464	14.594	12.452	0.107	0.088	3.028	3.088
	로그	0.074		3.150		12.463		0.091		2.814	
	이차다항	0.073		2.790		13.485		0.091		2.880	
	거듭제곱	0.056		1.926		11.274		0.083		2.768	
	지수	0.026		0.674		8.189		0.068		2.309	
10 일차	선형	0.073	0.048	3.070	1.485	12.722	11.035	0.089	0.082	2.789	2.541
	로그	0.051		1.857		10.551		0.074		2.616	
	이차다항	0.039		0.808		10.762		0.066		2.584	
	거듭제곱	0.042		1.316		9.639		0.070		2.588	
	지수	0.011		0.221		5.546		0.043		1.903	
15 일차	선형	0.031	0.026	0.825	0.724	9.602	8.572	0.058	0.050	2.391	2.335
	로그	0.024		0.387		8.376		0.056		2.390	
	이차다항	0.019		-0.362		7.529		0.045		2.282	
	거듭제곱	0.031		0.853		8.066		0.059		2.397	
	지수	0.003		0.034		2.897		0.020		1.379	
20 일차	선형	-0.010	0.020	-1.420	0.467	6.481	6.638	0.028	0.049	1.993	2.193
	로그	0.005		-0.656		6.833		0.043		2.229	
	이차다항	0.044		1.132		5.925		0.048		2.220	
	거듭제곱	0.024		0.627		7.108		0.052		2.270	
	지수	0.001		0.005		1.514		0.009		0.999	

<표 4.6> 방출강도 감소량 예측

(단위 : $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

경과 일수	함수종류	마감-A	마감-B	마감-C	마감-D	마감-E
50 일차	선형	-0.259	-14.890	-12.242	-0.155	-0.395
	로그	-0.055	-3.977	1.920	0.001	1.719
	이차다항	1.139	66.064	30.534	0.594	6.888
	거듭제곱	0.012	0.236	4.752	0.034	1.909
	지수	0.000	0.000	0.031	0.000	0.144
100 일차	선형	-0.674	-37.340	-43.447	-0.460	-4.375
	로그	-0.100	-6.490	-1.798	-0.030	1.333
	이차다항	6.564	387.484	201.949	3.504	33.868
	거듭제곱	0.007	0.112	3.505	0.025	1.674
	지수	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006
200 일차	선형	-1.504	-82.240	-105.857	-1.070	-12.335
	로그	-0.146	-9.003	-5.515	-0.062	0.946
	이차다항	30.914	1829.824	1033.779	16.824	159.828
	거듭제곱	0.004	0.054	2.584	0.018	1.469
	지수	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1000 일차	선형	-8.144	-441.440	-605.137	-5.950	-76.015
	로그	-0.251	-14.837	-14.146	-0.135	0.050
	이차다항	873.714	51744.544	31160.419	483.384	4623.508
	거듭제곱	0.001	0.010	1.274	0.009	1.083
	지수	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

선형함수는 <표 4.4>에서 보는 바와 같이 R^2 값이 가장 낮을 뿐만 아니라, 비선형으로 나타나는 TVOC 방출강도 실험결과를 대표하지 못하는 것으로 판단된다.

로그함수는 감소율 함수 중에서 R^2 이 가장 높은 것으로 나타났으며, <표 4.5>의 계산 결과와 실험결과가 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 <표 4.6>의 감소량 예측결과를 보면, 계산 결과가 음수로 표현되는데, 이는 시간이 경과함에 따라 건축자재가 실내오염물질을 흡착한다는 결과가 된다. 따라서, 로그함수는 실험결과를 대표하기에는 가장 정확한 함수지만, 실험결과 이후의 감소량을 예측에는 적당하지 못한 함수인 것으로 판단된다.

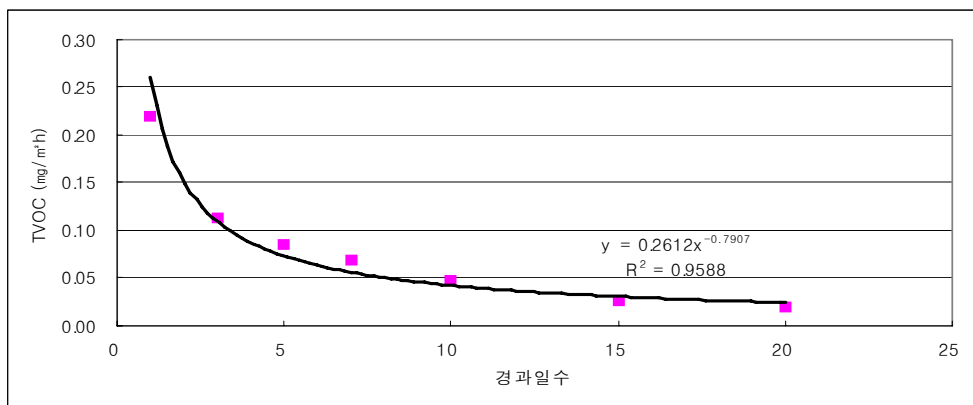
이차다항함수는 <표 4.5>에서 보는바와 같이 계산 결과는 전반적으로 실험결과와 매우 잘 일치한다. 그러나 <표 4.6>에서 보는바와 같이 시간이 경과함에 따라 방출강도가 지속적으로 증가하는 것으로 나타난다. 이는 U자 곡선을 나타내는 이차함수의 특성상 최저점이 나타난 후 다시 상승하기 때문이다.

거듭제곱함수는 로그함수 다음으로 R^2 값이 높은 함수이며, <표 4.5>에서 보는바와 같이 계산 결과와 실험결과 또한, 잘 일치한다. <표 4.6>의 감소량 예측 결과에서도 시간이 경과함에 따라 TVOC 방출강도가 지속적으로 감소함에 따라 실험결과뿐만 아니라, 실험결과 이후의 감소율을 예측하는데도 가장 적당한 함수인 것으로 판단된다.

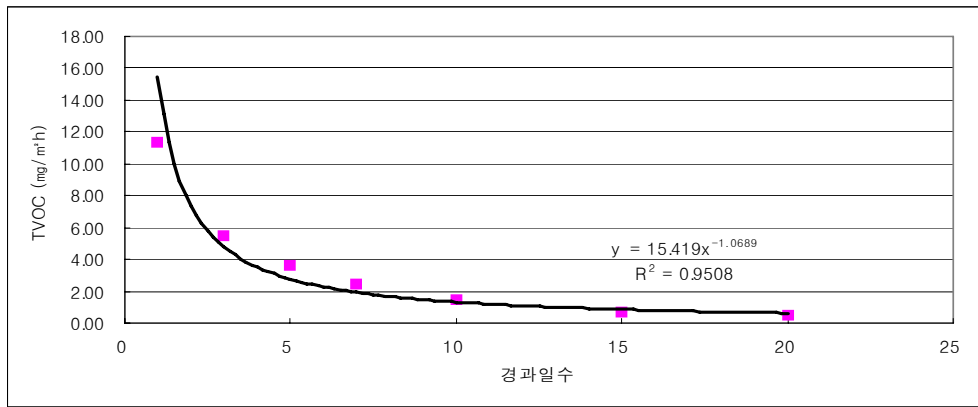
지수함수는 <표 4.5>의 계산 결과와 실험결과가 시간이 경과함에 따라 낮게 계산되는 경향을 보인다. 따라서, 지수함수는 실험결과뿐만 아니라 실험결과 이후의 감소량을 예측하는데 부적절한 함수인 것으로 판단된다.

따라서, 실험결과와 실험 이후의 감소량을 동시에 만족시키는 함수는 거듭제곱 함수이며, 거듭제곱함수로 나타난 마감구성재별 감소율은 마감-B > 마감-A > 마감-D > 마감-C > 마감-E 순으로 대체로 단위면적당 중량이 작은 벽지의 감소율이 크게 나타났다. 이와 비교하여 단위면적당 중량이 큰 마감-C과 마감-E는 감소율이 매우 작은 것으로 나타났다.

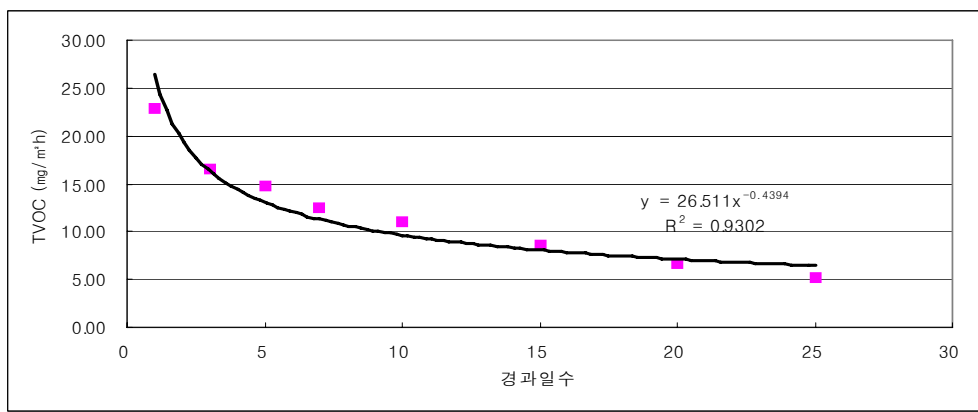
(그림 4.12)에서 (그림 4.16)은 거듭제곱함수로 나타난 각 마감구성재의 TVOC 방출강도 감소율 함수 그래프이다.



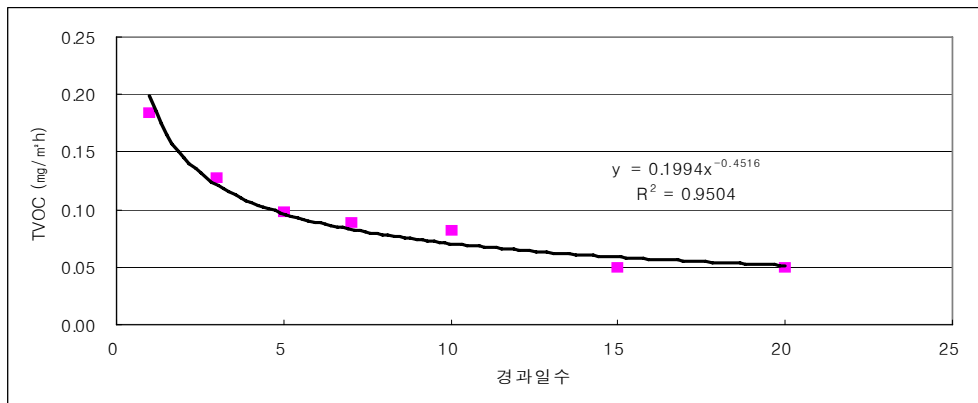
(그림 4.12) 마감-A의 TVOC 방출강도 감소율



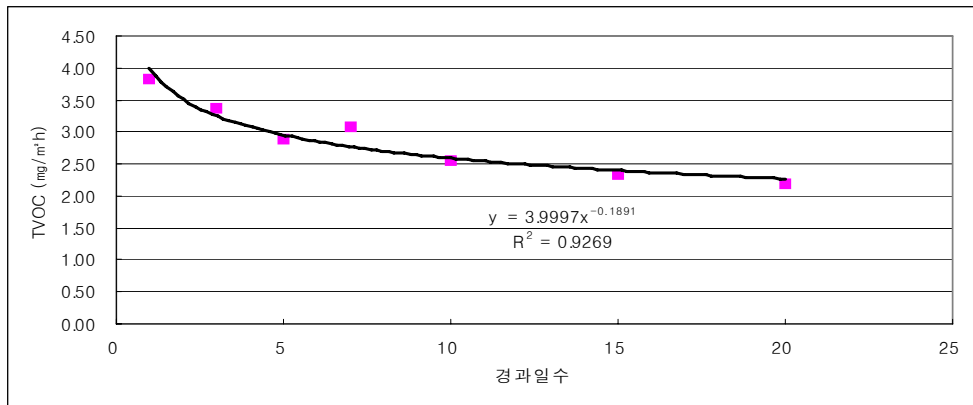
(그림 4.13) 마감-B의 TVOC 방출강도 감소율



(그림 4.14) 마감-C의 TVOC 방출강도 감소율



(그림 4.15) 마감-D의 TVOC 방출강도 감소율



(그림 4.16) 마감-E의 TVOC 방출강도 감소율

<표 4.7>은 감소율 함수를 이용하여 친환경 건축자재 단체품질 인증등급에 대하여 각 마감구성재의 방출강도가 도달하는 경과시간을 계산한 것이다. 마감-A와 마감-D는 각각 3.4일과 4.6일에 최우수 등급에 해당하는 $0.1\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 에 도달이 가능한 것으로 나타났으며, 마감-B는 초기 방출강도가 매우 높게 나타났으나, 감소율이 크기 때문에 111일 이후에는 $0.1\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 까지 낮아질 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 마감-C와 마감-E는 초기 방출강도 뿐만 아니라 감소율이 매우 낮기 때문에 $0.1\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 에 도달하기 위해서는 상당히 오랜 시간이 걸리는 것으로 나타났다.

<표 4.7> 인증등급 기준에 도달하기 위한 각 마감구성재의 경과 시간

$\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$	마감-A	마감-B	마감-C	마감-D	마감-E
0.1 미만 (최우수)	3.4일	111일	330,000일	4.6일	300,000,000일
0.2 미만 (우수)	1.4일	59일	68,000일	1일	7,600,000일
0.4 미만 (양호)	0.6일	31일	14,000일	0.22일	195,000일
2.0 미만 (일반1)	-	6.8일	359일	-	40일
4.0 미만 (일반2)	-	3.6일	74일	-	1일

4.4 소 결

실제 공동주택의 시공은 여러 건축자재들의 조합으로 이루어짐에 따라, 다양한 건축자재로 구성된 벽과 바닥과 같은 건축부위의 오염물질 방출특성은 개별 건축자재와 비교하여 다소 다르게 나타날 것으로 예상된다. 따라서, 공동주택에서 실내에 면하는 비율이 높은 벽과 바닥 등을 대상으로 실제 시공과 동일하게 마감구성재를 제작하고, 소형챔버를 이용하여 방출강도를 실험하였다. 이를 통하여 마감구성재의 방출강도와 특성 그리고 시간 경과에 따른 방출강도 변화를 분석하였으며, 마감구성재를 이루는 건축자재 중 실내공기에 큰 영향을 미치는 주요 건축자재를 파악하였다.

- 1) 폼알데하이드는 대체로 낮은 방출강도를 나타내어, 건축자재 시험결과와 큰 차이가 나타나지 않았다. 7일차를 기준으로 타일벽($0.046\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 온돌마루($0.011\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 종이벽지($0.006\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 립바닥재($0.004\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 실크벽지($0.002\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) 순으로 방출강도가 낮게 나타났다. 특히, 타일벽에서 타일 접착제의 사용량이 증가함에 따라 폼알데하이드 방출강도가 증가하여, 방출강도가 낮은 건축자재일지라도 과도한 사용은 실내공기에 영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다.
- 2) TVOC 방출강도는 마감구성재를 구성하는 건축자재에 따라 뚜렷한 차이가 나타났다. 20일차를 기준으로 타일벽($6.638\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 립바닥재($2.193\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 실크벽지($0.467\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 온돌마루($0.049\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) > 종이벽지($0.020\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) 순으로 방출강도가 낮게 나타났다.
- 3) 마감구성재를 구성하는 건축자재 중 TVOC 방출에 가장 큰 영향을 미치는 건축자재는 마감-A는 종이벽지, 마감-B는 실크벽지, 마감-C는 타일접착제, 마감-D는 온돌마루와 접착제 일부 성분, 마감-E는 접착제와 립바닥재 성분이 실내공기에 영향을 주고 있다. 따라서, 방출강도가 높은 건축자재는 방출면이 가려져 있는 경우에도 실내공기질에 큰 영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다.
- 4) TVOC 방출강도 감소율은 실크벽지 > 종이벽지 > 온돌마루 > 타일벽 > 립바닥재 순으로 낮게 나타났으며, 대체로 단위면적당 중량이 작은 벽지의 감

소율이 큰 것으로 나타났다. 이와 비교하여 단위면적당 중량이 큰 타일벽과 립 바닥재는 초기 방출강도가 클 뿐만 아니라 시간경과에 따른 감소율이 매우 작아 실내공기오염물질을 지속적으로 방출할 것으로 예상된다.

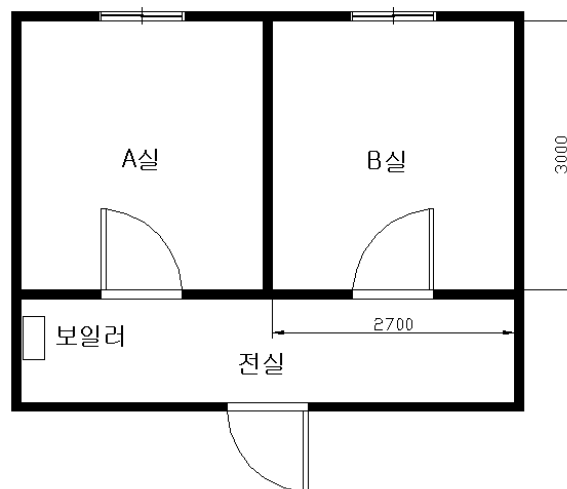
이상의 실험을 통하여 여러 건축자재들의 조합으로 인한 오염물질 방출특성을 파악하였다. 그러나 본 실험 결과는 엄격히 통제된 실험실 조건에서 수행한 것으로, 실제 공동주택에 시공되었을 때는 온도, 습도, 기류, 환기 등의 조건으로 인하여 차이가 나타날 수 있다. 특히, 시간당 0.5회의 환기량이 적용된 소형챔버 실험과 비교하여, 환기량의 변화가 심한 실제 공동주택 현장은 감소율이 다르게 나타날 것으로 예상된다. 따라서 실험에 사용된 건축자재를 실제 공동주택 현장에 적용하여 비교·검토하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

제 5 장 마감구성재 MOCK-UP 비교 실험

본 장은 두 개의 Mock-Up 실험실에 소형챔버에서 실시한 마감구성재를 적용하여 시공과정별로 실내공기오염물질 방출량 변화를 비교·분석하였다. 본 실험은 마감구성재가 실제 공동주택에 시공되었을 경우에는 온도, 습도, 기류, 환기 등의 조건으로 인하여 차이가 나타날 수 있을 것으로 판단되어 실시한 것으로, Mock-Up 실험실을 공동주택의 단위 공간인 침실과 거실 또는 기존 공동주택의 리모델링으로 가정하였다. Mock-Up 실험실 두실에는 각각 실내공기오염물질 방출강도가 낮은 건축자재(A실; 종이벽지, 온돌마루)와 높은 건축자재(B실; 실크벽지, 림바닥재)를 적용하여 시공과정별로 차이를 비교하였다.

5.1 Mock-Up 실험 개요

Mock-Up 실험실은 A실, B실과 전실로 구성되어 있으며, 난방을 위한 보일러와 환기시스템이 설치되어있다. (그림 5.1)은 Mock-Up 실험실 평면도이며, (그림 5.2)와 (그림 5.3)은 Mock-Up 실험실 외관과 보일러가 설치된 실내이다.



(그림 5.1) Mock-Up 실험실 평면도



(그림 5.2) Mock-Up 실험실 외관



(그림 5.3) Mock-Up 실험실 내부

Mock-Up 실험실 A실은 4장에서 실험한 마감구성재 중 오염물질 방출강도가 낮게 나타난 재료로, 벽과 천장은 마감-A(종이벽지), 바닥은 마감-D(온돌마루)를 시공하였다.

Mock-Up 실험실 B실은 4장에서 실험한 마감구성재 중 오염물질 방출강도가 높게 나타난 재료로, 벽과 천장은 마감-B(실크벽지), 바닥은 마감-E(름바닥재)를 시공하였다.

<표 5.1> Mock-Up 실험실에 시공된 건축자재

구분			HCHO (mg/m ² · h)		TVOC (mg/m ² · h)		적용 복합 자재
			방출강도	등급	방출강도	등급	
A실	종이벽지	PWP-012	0.003	최우수	0.102	우수	마감-A 마감-D
	숫초배벽지	FWP-003	0.007	최우수	0.001	최우수	
	온돌마루	WF-005	0.007	최우수	0.096	최우수	
	온돌마루접착제	BWF-002	0.006	최우수	0.063	최우수	
B실	실크벽지	SWP-011	0.002	최우수	4.726	등급외	마감-B 마감-E
	일반초배벽지	FWP-005	0.002	최우수	0.004	최우수	
	바인더	WPBinder	0.029	최우수	1.050	일반1	
	름바닥재	RF-001	0.004	최우수	0.270	양호	
	접착제	BWI-006	0.043	최우수	12.746	등급외	
공통 적용	도배폴	WB-002	0.011	최우수	0.008	최우수	-
	석고보드	WAL-002	0.005	최우수	0.173	우수	
	석고퍼터	WC-004	0.024	최우수	0.051	최우수	
	레미탈	WAL-001	0.002	최우수	0.005	최우수	

Mock-Up 실험실에 공통으로 사용된 자재는 도배풀, 석고보드, 석고퍼터, 레미탈이다. Mock-Up 실험실의 벽은 석고보드를 시공하고, 바닥은 기존의 레미탈 바닥면이 거칠게 시공되어 있어 바닥재 시공이 용이하지 않게 된 관계로 레벨콘³⁹⁾을 사용하여 바닥면을 평탄하게 하였다.

Mock-Up 실험실 A실과 비교하여 B실의 시공비는 도배시공 재료비 약 2배, 시공비 약 3배가 소요되었으며, 바닥시공은 재료비 약 1.5배, 시공비는 동일하게 소요되었다. 전체적으로 B실의 시공에는 A실의 약 2배 이상의 비용이 소요되었다. (그림 5.4)는 A실 온돌마루 시공장면이며, (그림 5.5)는 B실 립바닥재 시공장면이다.



(그림 5.4) 온돌마루 시공



(그림 5.5) 립바닥 시공

각 시공과정별 실험은 실내공기질공정시험방법에 의거하여 실험 전 최소 30분간 환기를 실시하였고, 이후 5시간 밀폐 후에 실시하였다. 실험 및 각 단계별 시공 후에는 환기시스템 및 자연환기를 이용하여 실내가 최대한 환기되도록 유지하였다. 측정 당시 실내의 온도조건은 시공 완료 전까지 자연실온 상태에서 측정하였으며, 시공 완료된 후에는 난방을 실시하여 측정하였다.

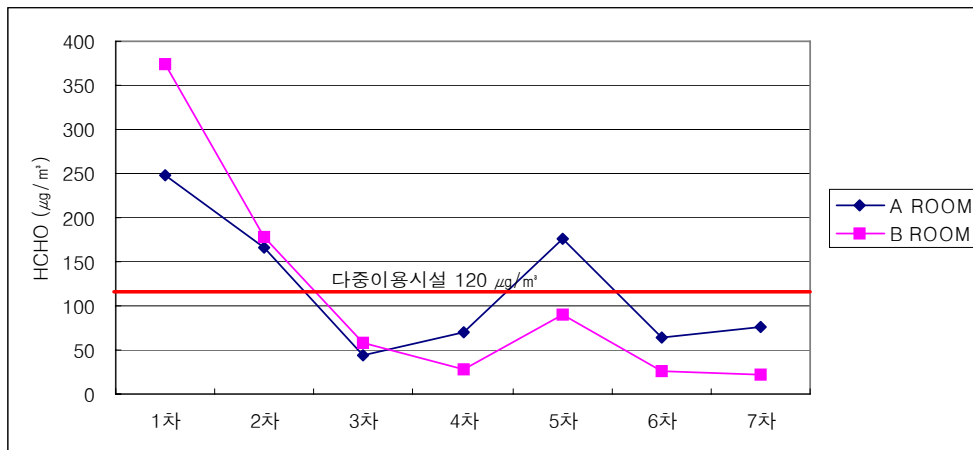
39) 시멘트의 일종으로 골재, 결합재, 첨가제가 혼합되어 있는 바닥용 미장재로서 물과 혼합시 자체 유동성이 뛰어나 마감 흠손 작업을 하지 않고도 표면 평활성이 발휘되는 제품 ; 방출강도시험 미실시

5.2 마감구성재 Mock-Up 비교 실험결과

실험은 건축자재 시공과정 및 건물 사용단계를 고려하여 7차례에 걸쳐 실시하였다. 실험과정 중에 측정된 외기의 폼알데하이드 및 TVOC 농도는 각각 $6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $101.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. <표 5.2>와 (그림 5.6)은 A실과 B실의 시공과정별 폼알데하이드 방출량 변화를 나타낸 것이다.

<표 5.2> Mock-Up 실험실 시공과정별 HCHO 방출량 변화

실험 횟수	시공과정	측정일	A실			B실		
			HCHO 방출량 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	온도 ($^{\circ}\text{C}$)	습도 (%)	HCHO 방출량 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	온도 ($^{\circ}\text{C}$)	습도 (%)
1차	벽체, 바닥 시공후	3. 15	247.6	21.1	50.0	373.8	20.8	52.0
2차	도배시공 후	3. 26	166.9	12.9	61.0	177.9	12.7	64.0
3차	바닥시공 1일후	3. 30	44.5	14.8	30.0	58.8	14.7	32.0
4차	바닥시공 3일후	4. 01	70.7	16.1	33.0	27.4	15.7	31.0
5차	난방실시	4. 10	175.7	26.9	44.0	89.8	27.2	35.0
6차	난방지속 (7일경과)	4. 17	64.0	26.4	16.0	26.7	27.2	15.0
7차	난방지속 (14일경과)	4. 24	76.0	29.6	15.0	22.1	29.3	15.0



(그림 5.6) Mock-Up 실험실 HCHO 방출량 비교

Mock-Up 실험실 A실 폼알데하이드는 벽체 및 바닥시공에서부터 도배시공까지 매우 많은 방출량을 나타내었다. 특히, 1차 실험인 벽체 및 바닥시공 후에는 $247.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 다중이용시설등의 실내공기질관리법의 폼알데하이드 기준 $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 2배 이상 넘는 것으로 나타났다. 외기 측정 결과와 3장의 시험결과에서 외기와 일반 건축자재에서 폼알데하이드가 매우 낮게 나타난 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.

2차 실험인 도배시공 이후 폼알데하이드 방출량은 $166.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크게 감소하였고, 3차 실험인 온돌마루시공 이후에는 $44.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 더욱 급격히 감소하였다. 이는 레벨콘에서 발생하는 폼알데하이드 방출량이 시간이 경과함에 따라 수분과 함께 감소함과 동시에, 온돌마루에 의해 레벨콘 노출면이 가려지게 되어 실내공기로의 방출이 억제되었기 때문인 것으로 판단된다.

그러나 4차 실험인 온돌마루시공 3일 후에는 $70.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 방출량이 다소 증가하였으며, 이후 5차 실험인 난방실시 후에는 $175.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다시 크게 증가하여 국내 기준치를 초과하였다. 이는 온돌마루 자체에 잔류하던 폼알데하이드가 바닥온도 상승에 따라 실내 공기 중으로 방출된 것으로 판단된다. 이후 6차 실험인 난방 7일 후에는 $64.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크게 감소하였고, 7차 실험인 난방 14일 후에는 $76.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다시 증가하였다.

Mock-Up 실험실 B실 폼알데하이드는 A실의 결과와 동일하게 1차 실험인 벽체 및 바닥시공과 2차 실험인 도배시공에서 각각 $378.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $177.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 매우 많은 방출량을 나타내었으며, 3차 실험인 립 바닥시공 이후에는 $58.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 급격히 감소하였다. 따라서, 초기의 폼알데하이드 발생은 전술한 바와 같이 레벨콘의 영향인 것으로 판단된다.

4차 실험인 립 바닥시공 3일 후에는 $27.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 방출량이 더욱 감소하였으며, 이후 5차 실험인 난방실시 후에는 $89.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다소 증가하였으나, A실과는 달리 국내 폼알데하이드 기준치를 초과하지 않았다. 그러나 이후 6차와 7차 실험인 난방 실시 7일과 14일 후에는 각각 $26.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $22.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 방출량이 크게 감소하였다.

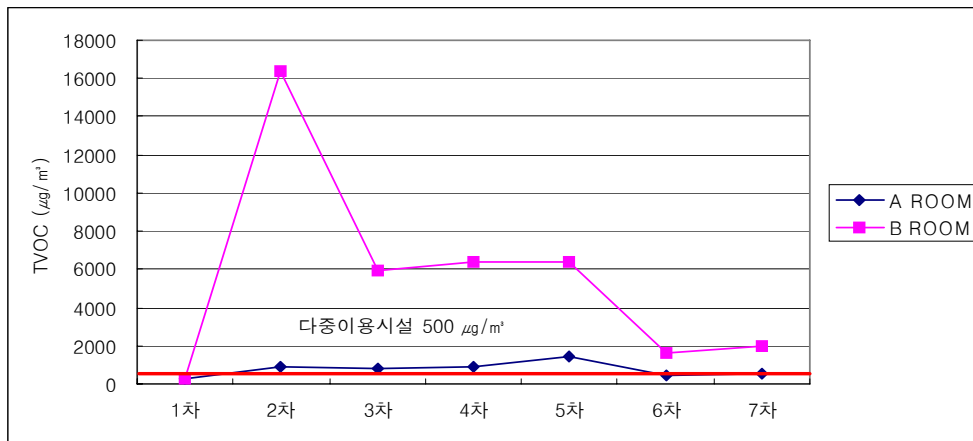
Mock-Up 실험실 A실과 B실의 폼알데하이드 크로마토그램을 분석한 결과, 폼

알데하이드가 증가하기 시작한 4차 실험인 바닥시공 3일 후에는 B실과 비교하여 A실이 폼알데하이드 뿐만 아니라 폼알데하이드와 같은 알데하이드 계통인 Acetone 피크도 증가하였다. 이는 A실이 목재인 관계로 양생과정에서 방출량이 다소 증가하였기 때문인 것으로 판단되며, 3장과 4장의 실험결과와 일치한다. 또한, 5차 실험인 난방실시 후에 폼알데하이드 뿐만 아니라 Acetone 피크도 크게 증가하였다. 이는 난방을 통한 실내 온도 상승으로 건축자재 내에 있던 오염물질이 일시적으로 방출된 것으로 판단된다. Mock-Up 실험실 A실과 B실의 시공과정별 폼알데하이드 크로마토그램은 부록 (그림 11)에서 (그림 17)에 나타내었다.

<표 5.3>과 (그림 5.7)은 Mock-Up 실험실 A실과 B실의 시공과정별 TVOC 방출량 변화를 나타낸 것이다.

<표 5.3> Mock-Up 실험실 시공과정별 TVOC 방출량 변화

실험 횟수	시공과정	측정일	A실			B실		
			TVOC 방출량 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	온도 ($^{\circ}\text{C}$)	습도 (%)	TVOC 방출량 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	온도 ($^{\circ}\text{C}$)	습도 (%)
1차	벽체, 바닥 시공후	3. 15	275.7	21.1	50.0	291.0	20.8	52.0
2차	도배시공 후	3. 26	938.3	12.9	61.0	16403.3	12.7	64.0
3차	바닥시공 1일후	3. 30	767.7	14.8	30.0	5953.8	14.7	32.0
4차	바닥시공 3일후	4. 01	857.8	16.1	33.0	6410.1	15.7	31.0
5차	난방실시	4. 10	1438.6	26.9	44.0	6379.2	27.2	35.0
6차	난방지속 (7일경과)	4. 17	454.9	26.4	16.0	1615.5	27.2	15.0
7차	난방지속 (14일경과)	4. 24	528.4	29.6	15.0	2004.9	29.3	15.0



(그림 5.7) Mock-Up 실험실 TVOC 방출량 비교

Mock-Up 실험실 A실 TVOC는 1차 실험인 벽체 및 바닥시공 후에는 $275.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일반 대기 수준의 매우 적은 방출량을 나타내었으나, 2차 실험인 도배시공 후에는 $938.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상당히 증가되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 4장의 결과와 같이 시공 초기에는 재료의 특성이 변화하여 비교적 많은 양의 오염물질을 일시에 방출하기 때문인 것으로 판단된다. 이후 3차 실험인 온돌마루 바닥시공 1일 후에는 $767.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 소폭 감소하였다가, 4차 실험인 온돌마루 바닥시공 3일 후에는 $857.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다시 증가하였다. 그러나 5차 실험인 난방실시 후에는 TVOC 방출량이 $1438.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 급격하게 증가하였는데, 이는 폼알데하이드 결과와 같이 온돌마루 자체에 잔류하던 오염물질이 바닥온도 상승에 따라 실내 공기 중으로 방출된 것으로 판단된다. 이후 6차 실험인 난방 지속 7일 후에는 $454.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 방출량이 크게 감소하였다. TVOC 방출강도가 낮은 건축자재를 사용한 Mock-Up 실험실 A실은 시공 시작 약 40일 경과 후인 7차 실험에서 TVOC 방출량은 $528.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 국내 다중이용시설등의 실내공기질관리법 기준인 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 거의 근접하였다. 4장의 종이벽지와 온돌마루로 제작된 마감-A와 마감-D 마감구성재가 시간이 경과함에 따라 방출강도가 지속적으로 감소한 결과를 바탕으로, Mock-Up 실험실 A실의 TVOC 방출량은 시간이 경과하면 더욱 감소할 것으로 예상된다.

Mock-Up 실험실 B실 TVOC는 1차 실험인 벽체 및 바닥시공 후에는 $291.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 대기 수준의 매우 작은 방출량을 나타내어 A실의 결과와 비슷한 결과를 나타내었다. 그러나 2차 실험인 도배시공 후에는 TVOC 방출량이 $16403.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로

초기의 약 56배, A실의 17배로 매우 크게 증가하였다. 이는 3장과 4장의 실험결과와 같이 실크벽지에서 방출되는 오염물질이 원인인 것으로 나타났다. 3차 실험인 립바닥 시공 1일 후에는 TVOC 방출강도가 매우 높은 PIB를 주성분으로 하는 접착제를 사용하였음에도 TVOC 방출량은 $5953.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크게 감소하였고, 4차 실험인 3일 이후에는 $6410.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다시 증가한 것으로 나타났다. 5차 실험인 난방 실시 후에는 TVOC 방출량이 급격히 증가한 A실과 달리 B실은 $6379.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 오히려 감소하였으며, 6차 실험인 난방 지속 7일 후에도 $1615.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크게 감소하였다. TVOC 방출강도가 높은 건축자재를 사용한 Mock-Up 실험실 B실은 시공 시작 40일이 경과후인 7차 실험에서 TVOC 방출량은 $2004.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 A실의 3.8배, 국내 기준의 4배 이상으로 나타났다. 그러나 4장의 마감구성재 TVOC 방출강도 및 감소율과 비교하여 A실은 다소 감소량이 느리게, B실은 다소 빠르게 나타났다. 이는 A실의 경우 소형챔버 실험과는 달리 실험실 내에 공급되는 공기가 필터로 정화되지 않은 대기로 채워져 있었기 때문이며, B실의 경우 특히 시공과정 중의 많은 환기량의 영향으로 다소 빠르게 오염물질이 배출된 것으로 판단된다.

Mock-Up 실험실 A실과 B실의 TVOC 크로마토그램을 분석한 결과, A실은 2차 실험인 도배시공 후에 R.T 23.5분에 나타나는 Toluene의 피크가 크게 증가하였다. 5차 실험인 난방 실시 후에는 Toluene와 함께 다른 물질들의 피크가 다량 검출되어 이로 인하여 TVOC 방출량이 증가한 것을 확인하였다. B실은 2차 실험인 도배시공 후에 Toluene와 함께 실크벽지에서 나타나는 R.T 39분 이후에 수많은 VOCs가 나타나고 있다. 3차 실험인 바닥 시공 1일 후에는 Toluene 피크가 크게 증가하였는데, 이는 B실의 립바닥재와 이를 접착하기 위해 사용한 PIB를 주성분으로 하는 접착제인 것으로 판단된다. 반면, 실크벽지에서 나타나는 R.T 39분 이후의 피크는 매우 크게 감소하였다. 5차 실험인 난방 실시 후에는 3장의 PIB (PolyIsoButylene)를 주성분으로 하는 접착제의 크로마토그램과 패턴과 같이 Toluene 피크가 매우 두껍게 나타남과 동시에 Toluene 방출량이 크게 증가하였다. 이는 바닥면이 난방으로 가열되어 바닥 접착제가 활성화되어 시공 틈새 등을 통하여 실내로 방출되는 것으로 판단된다. 그러나 실크벽지에서 나타나는 R.T 39분 이후의 피크들은 몇 개 피크를 제외하고 거의 사라졌다. 따라서, B실은 바닥 접착제에서 증가한 오염물질과 실크벽지에서 감소한 오염물질이 서로 상쇄되어 A실과 달리 난방 실시 후에 TVOC 방출량이 증가하지 않은 것으로 나타났다. Mock-Up 실험실 시공과정별 TVOC 크로마토그램은 부록 (그림 18)에서 (그림

24)에 나타내었다.

실내공기질공정시험방법 중 공동주택 실내공기질 시험방법에는 공동주택의 6종 VOCs 측정항목을 Benzene, Toluene, Etylbenzene, Xylene, Styrene, 1,4-Dichlorobenzene으로 정하였으나, 이에 대한 기준 또는 가이드라인은 설정되어 있지 않다. 따라서, 일본 후생노동성의 실내공기 중 VOCs 가이드라인과 홍콩 실내공기질 가이드라인 중 우수등급의 개별 VOCs 가이드라인을 실험결과와 비교하였다. 두 국가의 가이드라인 중 더욱 엄격한 것을 적용하여 비교하였으며, 사용한 가이드라인은 <표 5.4>와 같다.

<표 5.4> 공동주택 6종 VOCs 국외 가이드라인

단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$	홍콩	일본	비교 가이드라인
Benzene	16.1	-	16.1
Toluene	1092	260	260
Etylbenzene	1447	3800	1447
Xylene	1447	870	870
Styrene	-	220	220
1,4-Dichlorobenzene	200	240	200

<표 5.5>는 A실의 시공과정별 6종 VOCs 방출량을 나타낸 것이다. 가장 많이 검출된 것은 Toluene으로, 5차 실험인 난방 실시 후에 $355.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크게 증가하였으나, 6차와 7차 실험인 난방 지속 7일과 14일 후 지속적으로 감소하였다.

<표 5.5> A실의 6종 VOCs 방출량 (단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

실험 회수	시공 과정	측정일	Benzene	Toluene	Etylbenzene	Xylene	Styrene	1,4-Dichlorobenzene
1차	벽체,바닥후	3. 15	1.0	7.8	11.8	24.0	0.7	0.0
2차	도배후	3. 26	1.7	100.0	2.4	4.7	0.7	0.0
3차	온돌 1일후	3. 30	1.0	122.9	4.3	7.8	0.3	0.0
4차	온돌 3일후	4. 01	1.5	164.9	5.9	9.2	0.5	0.0
5차	난방 실시	4. 10	0.8	355.7	13.5	17.9	1.3	0.0
6차	난방 지속	4. 17	0.7	164.4	3.2	5.1	0.5	0.0
7차	난방 지속	4. 24	0.4	160.1	4.1	6.8	0.8	0.0

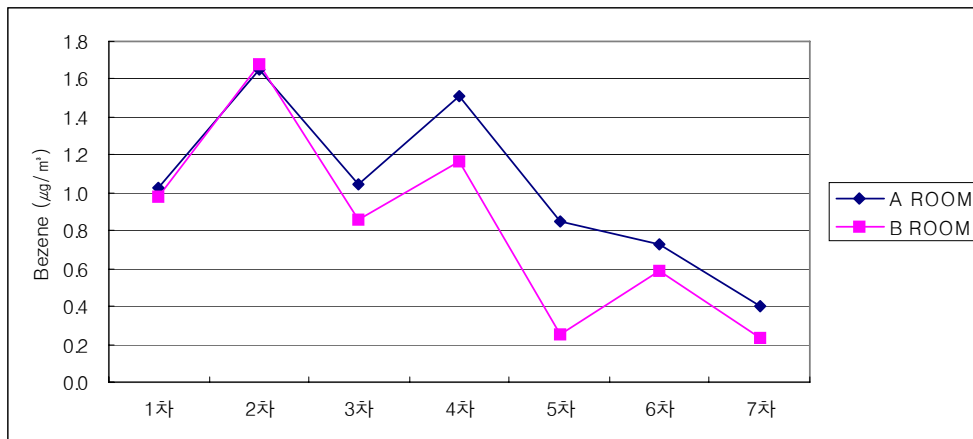
<표 5.6>은 B실의 시공과정별 6종 VOCs 방출량을 나타낸 것이다. <표 5.4>의 가이드라인과 비교하여, Benzene, Etylbenzene, Xylene, Styrene은 현저히 낮은 수준으로 검출되었고 1,4-Dichlorobenzene은 검출되지 않아, A실 결과와 유사하게 나타났다. 그러나 Toluene은 3차 실험인 립바닥을 시공한 이후 $561.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 증가하였고, 5차 실험인 난방실시 후에는 $1065.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 더욱 늘어났다. 6차 실험인 난방 지속 7일 후에는 $507.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 립바닥 시공 후의 수준으로 감소하였다가, 7차 실험인 난방지속 14일 후에는 $593.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다시 증가하여, 일본의 가이드라인인 $260\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 만족하지 못하였다.

<표 5.6> B실의 6종 VOCs 방출량 (단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

실험 회수	시공과정	측정일	Benzene	Toluene	Etylbenzene	Xylene	Styrene	1,4-Dichlorobenzene
1차	벽체,바닥후	3. 15	1.0	7.7	11.3	20.5	0.6	0.0
2차	도배후	3. 26	1.7	55.6	2.5	5.4	0.3	0.0
3차	립바닥1일후	3. 30	0.9	561.2	4.3	12.9	0.2	0.0
4차	립바닥3일후	4. 01	1.2	567.7	5.1	13.6	0.3	0.0
5차	난방실시	4. 10	0.3	1065.4	12.6	36.1	1.6	0.0
6차	난방지속	4. 17	0.6	507.6	4.4	12.3	0.0	0.0
7차	난방지속	4. 24	0.2	593.5	7.0	20.5	0.7	0.0

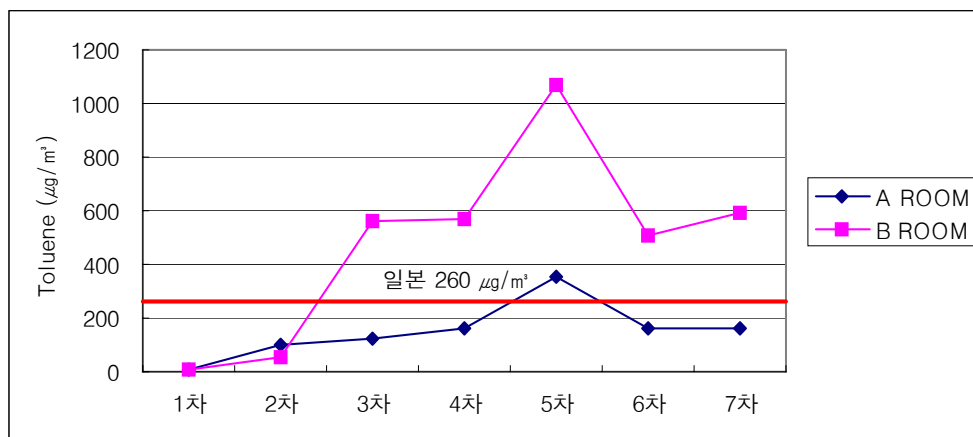
(그림 5.8)에서 (그림 5.12)는 A실과 B실에서 검출된 6종 VOCs 방출량 변화를 시공과정별로 비교하여 그래프로 나타낸 것이다.

(그림 5.8)의 시공과정별 Benzene의 방출량 변화 그래프를 보면, 도배시공과 바닥재 설치 3일 후인 2차와 4차 실험에서 소폭 증가하다가 이후 지속적으로 감소하는 패턴을 나타내고 있다. A실이 다소 높은 방출량을 나타내고 있으나, 두 실 모두 홍콩의 가이드라인 $16.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였다.



(그림 5.8) 시공과정별 Benzene 방출량 변화

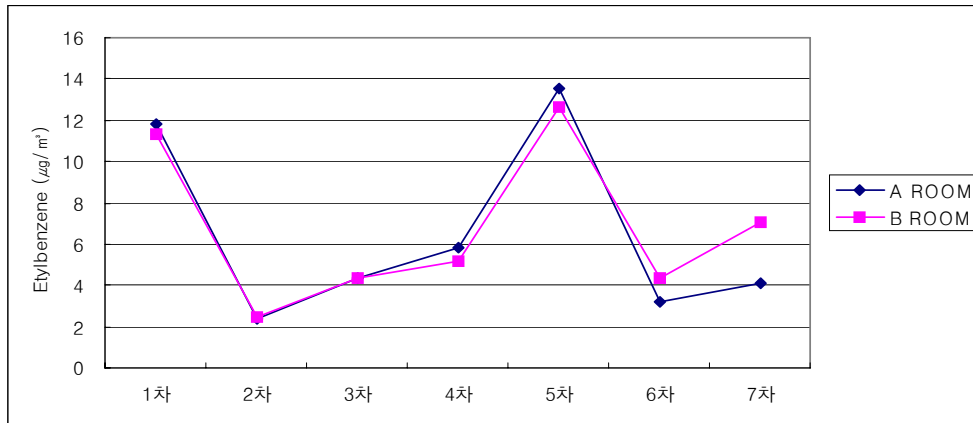
(그림 5.9)는 시공과정별 Toluene의 방출량 변화 그래프로, A실은 시공과정마다 소폭 증가하다가 5차 실험인 난방 실시 후에 급격하게 증가하였다. 그러나 이후 다시 감소하여 일정한 수준으로 방출량이 유지되었다. B실은 각각 3차와 5차 실험인 바닥시공 후와 난방 실시 후에 급격한 방출량 증가를 나타내었으며, 시간이 경과한 후 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타내었다. B실은 3차 실험인 립바닥재 시공 이후 일본의 가이드라인 $260\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하고 있다.



(그림 5.9) 시공과정별 Toluene 방출량 변화

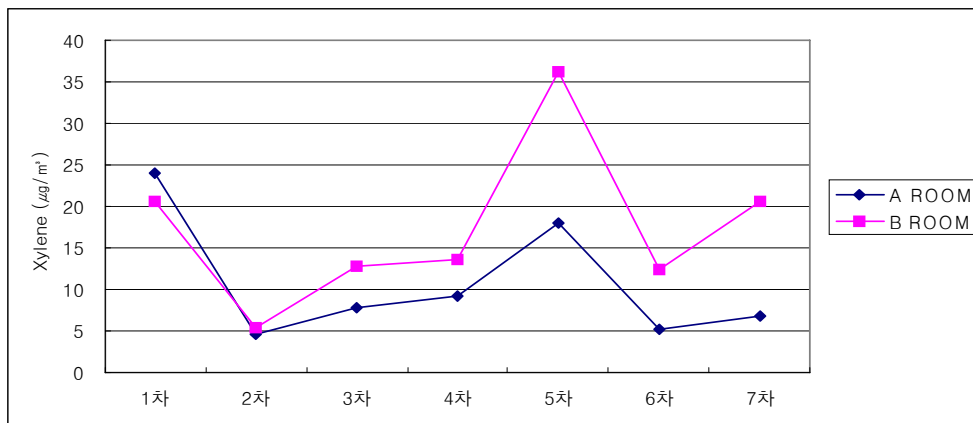
(그림 5.10)은 시공과정별 Ethylbenzene의 방출량 변화 그래프로, A실은 2차 실험

협인 도배시공 후 크게 감소하다가, 5차 실험인 난방실시 후 다시 증가하였다. 이후 6차 실험인 난방지속 7일후에 방출량이 크게 감소하였다가, 7차 실험인 난방지속 14일후에는 약간 증가하였다. B실은 A실과 패턴이 거의 유사하게 나타났으며, 이후 6차와 7차 실험에서 A실보다 방출량이 다소 크게 나타났다. 그러나 두 실 모두 홍콩의 가이드라인 $1447\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였다.



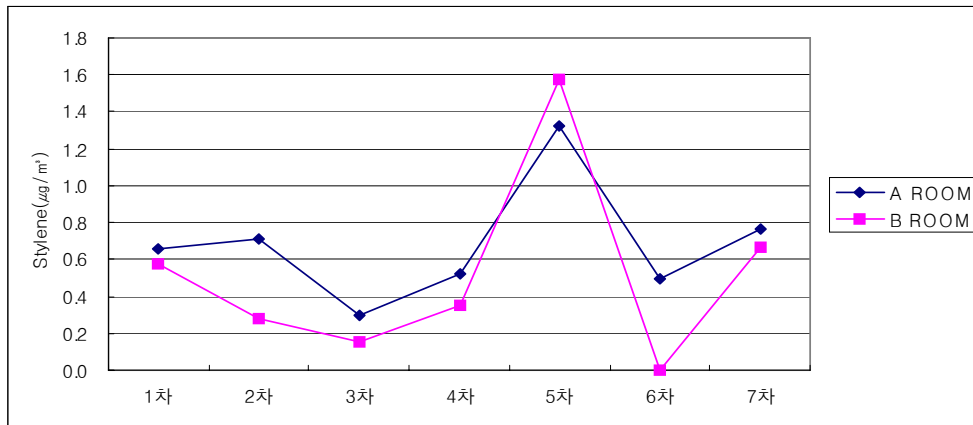
(그림 5.10) 시공과정별 Etylbenzene 방출량 변화

(그림 5.11)은 시공과정별 Xylene의 방출량 변화 그래프로, 패턴 변화는 Etylbenzene의 경우와 거의 유사하게 나타났으나, B실이 다소 낮게 나타났다. 두 실 모두 일본의 가이드라인 $870\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였다.



(그림 5.11) 시공과정별 Xylene 방출량 변화

(그림 5.12)은 시공과정별 Styrene의 방출량 변화 그래프로, A실과 B실 모두 5차 실험인 난방실시 후에 방출량이 크게 증가하였다. 이후 6차와 7차 실험에서 방출량이 감소하였다가 다시 증가하여 Benzene을 제외한 Toluene, Etylbenzene, Xylene과 유사한 변화 패턴을 나타내었다. Styrene 또한, 두 실 모두 일본의 가이드라인 $220\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였다. 그러나, 모든 시공과정에서 1,4-Dichlorobenzene은 검출되지 않았다.



(그림 5.12) 시공과정별 Styrene 방출량 변화

5.3 소 결

본 실험은 4장에서 실시한 마감구성재가 실제 공동주택에 시공되었을 경우, 온도, 습도, 기류, 환기 등의 조건으로 인한 차이가 나타날 수 있을 것으로 판단되어 실시한 것으로, 공동주택의 단위 공간을 재현한 두 개의 Mock-Up 실험실에 소형챔버에서 실시한 마감구성재를 적용하여 시공과정별로 실내공기오염물질 방출량 변화를 비교·분석하였다.

- 1) TVOC 방출강도가 낮은 건축자재를 적용한 Mock-Up 실험실 A실(종이벽지, 온돌마루)의 폼알데하이드 방출량은 난방을 실시한 후에는 $175.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 다중이용시설등의 실내공기질관리법 기준인 $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였으나, 이후 방출량이 감소하여 시공 40일이 경과한 후에는 $76.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 기준을 만족하였다. TVOC 방출량은 시공과정 중에서 많은 오염물질이 방출되었으며, 특히 난방을 실시한 후에는 $1438.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 기준치를 크게 초과하였으나, 비교적 짧은 시간 내에 감소하여 시공 40일이 경과한 후에는 $528.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 기준인 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 근접하게 도달하였다. 6종 VOCs 방출량 또한, 홍콩과 일본 등의 가이드라인 기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다.
- 2) TVOC 방출강도가 높은 건축자재를 적용한 Mock-Up 실험실 B실(실크벽지, 립바닥재)의 폼알데하이드 방출량은 바닥재를 설치함과 동시에 매우 크게 감소하여, 시공 40일이 경과한 후에는 $22.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 A실보다도 적은 방출량을 나타내었다. TVOC 방출량은 도배시공 후에 $16403.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 급격히 증가하였다가 이후 계속 감소하였다. 립바닥 시공 이후에는 립바닥 접착제에서 방출하는 오염물질은 증가하고, 실크벽지에서 방출하는 오염물질은 감소하여 일정한 수준을 유지하였다. 이후 시간이 경과함에 따라 TVOC 방출량은 큰 폭으로 감소하였으나, 시공 40일 경과 후 $2004.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 기준의 4배 이상으로 나타났다. 6종 VOCs 방출량 또한, 바닥재 설치 이후 Toluene이 급격히 증가하여 시공 40일이 경과한 후에도 $593.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 홍콩과 일본 등의 가이드라인 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.
- 3) 폼알데하이드와 TVOC 모두 마감구성재 실험에서 종이벽지와 온돌마루가 실크벽지와 립바닥재보다 방출강도가 높게 나타난 것이 Mock-Up 실험에서도 재

현되어 두 실험의 방출특성과 패턴은 동일한 것으로 나타났다. 그러나 온도, 습도, 기류, 환기 등의 조건과 시공에 따른 시간 그리고 실험방법 등으로 인하여 방출량은 차이가 나타났으며, 특히 A실은 대기의 오염물질이 같이 검출되어 방출량이 다소 높게, B실은 많은 환기로 인하여 다소 낮게 나타나, 차이가 나타났다.

이상의 실험 결과, 공동주택의 실내공기질 개선은 비용을 추가하거나 특별한 기술을 적용하기 전에 우선적으로 오염물질 저방출 건축자재를 사용하는 것임을 확인하였다. 그러나 실제 공동주택은 더욱 다양한 건축자재를 사용하고 복잡한 시공과정을 통하여 건설되므로 오염물질 발생 측면에서 공동주택의 시공 전과정을 검토하는 것이 바람직하다.

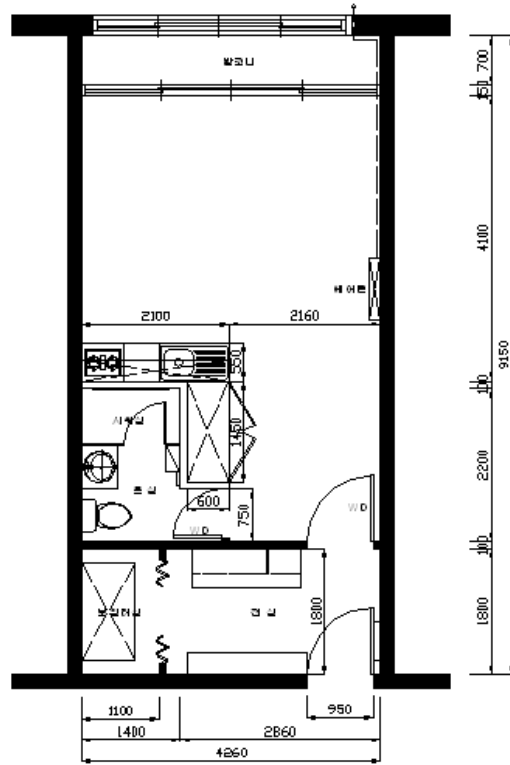
제 6 장 원룸아파트 시공 전과정에 따른 오염물질 방출량 분석

5장에서 실시한 Mock-Up 실험은 공동주택의 단위 공간을 대상으로 한 실험으로, 다양한 건축자재들이 복합적으로 사용되고 있는 실제 공동주택의 상황과는 큰 차이가 있다. 일반적으로 국내 공동주택의 실 구성은 현관, 거실, 침실, 주방, 부엌, 발코니 등으로 나눌 수 있으며, 각 실에 사용되는 건축자재는 실의 사용 목적에 따라 서로 다르다. 예를 들어 침실은 벽지와 바닥재가 대부분의 실 표면에 시공되는 반면, 욕실은 타일과 각종 실링재, 주방은 타일과 주방가구, 그리고 발코니는 일반적으로 페인트로 시공된다. 건축자재마다 사용량도 크게 달라 오염물질이 많이 방출되지만 소량을 사용하는 재료가 있고, 그 반대의 경우도 있다. 또한 오염물질을 많이 방출하고 많은 양을 사용하는 건축자재지만, 다른 건축자재에 가려져 표면이 노출되지 않는 것도 있다. 따라서, 실내공기오염물질의 정확한 발생원인을 파악하기 위해서는 공동주택 시공 전과정을 대상으로 단계적인 측정 분석이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 실물 원룸아파트를 건설하여 공동주택 시공 전과정에서의 실내공기오염물질 방출량 변화를 분석함으로써, 벽과 바닥 외 오염물질을 발생시키는 기타 건축자재 및 시공단계를 파악하고자 하였다. 이에 따라, 벽과 천장 그리고 바닥 등을 제외한 기타 건축자재에서 방출되는 오염물질의 확인이 용이하도록 주요 건축부위는 5장 Mock-Up 실험실 A실에 적용한 건축자재를 사용하였다.

6.1 원룸아파트 시공과정 및 실험 개요

공동주택 시공 전과정에서의 실내공기오염물질 방출량 변화를 살펴보기 위하여 중앙대학교 공과대학 7층에 일반적인 공동주택 시공과 동일한 과정과 방법으로 실 평수 9평 규모의 원룸아파트를 건설하였다. 원룸아파트 내부는 추후 환기 실험을 병행 할 수 있도록 전열교환식 천장급배기 환기시스템과 바닥온돌열교환식 환기시스템을 설치하였고, 난방이 가능하도록 보일러를 설치하였다. 원룸아파트 내부는 크게 실험 준비를 위한 전실과 실내로 구획하였으며, 실내는 주방 겸용 거실과 욕실 그리고 발코니로 구성하였다. (그림 6.1)에 원룸아파트의 평면도를 나타내었다.



(그림 6.13) 원룸아파트 평면도

원룸아파트 시공은 다음과 같은 순서로 진행하였다.

1) 골조 시공

기존의 시설을 모두 철거한 후, 실을 구획하였다. 기존의 시설을 이용하므로 기존 시설의 철거를 골조시공 완료로 가정하였다. (그림 6.2)는 공사 전 철거상태의 모습이다.



(그림 6.14) 기존 시설 철거

2) 설비 시공

실 구축에 따라 급배수 시설 및 보일러 배관을 시공하였다. 원룸아파트가 시공되는 건물의 여건상 오수배관은 생략하였으며, 난방은 축열식 심야전기보일러를 설치하였다. (그림 6.3)은 설비 시공과정을 요약한 그림이다.



(그림 6.15) 설비 시공

3) 환기시스템 시공

추후 환기실험을 위한 전열교환식 천장급배기 환기시스템과 바닥온돌열교환식 환기시스템을 설치하였으며, 각 취출구의 온도를 측정하기 위해 열전대를 설치하였다. (그림 6.4)는 환기시스템 시공과정을 요약한 그림이다.



(그림 6.16) 환기시스템 시공

4) 벽체 및 바닥 시공

발코니가 이루어질 부분에 시스템 창호를 설치한 후, 기존 벽면에 엠바를 세우고 석고보드를 부착하였다. 최근에는 기본 골조 이외 간막이벽은 석고보드를 이용한 건식공법을 주로 사용한다. 석고보드 마감은 기존의 시멘트를 이용한 습식 방법과 비교하여 편리할 뿐 아니라, 계절에 관계없이 시공이 가능하고 시공 속도가 빨라 선호하는 방법이다. 벽면이 완성된 후에는 석고보드로 천장을 마감하였다. 현장 여건상 기포콘크리트를 EPS(발포폴리스틸렌) 블록으로 대체하여 시공

한 후, 온수코일을 시공하였다. 온수코일 시공 후, 레미탈을 이용하여 실내 바닥면을 완성하였다. (그림 6.5)는 벽체 및 바닥 시공과정을 요약한 그림이다.



(그림 6.17) 벽체 및 바닥 시공

5) 욕실 방수 및 타일 시공

배수를 위하여 배수구와 배수관을 설치하였다. 욕실은 주로 물을 사용하는 공간이기 때문에 욕실바닥 전체와 벽면 일부에 우레탄 방수를 하였으며, 방수액이 건조된 후에는 타일을 시공하였다. 최근의 타일 시공은 시멘트 몰탈을 이용한 습식 방법에서, 시공의 편의를 위해서 접착제를 이용한 건식방법으로 교체되고 있으며, 주방 타일은 모두 건식방법으로 시공되고 있다. 특히, 석고보드로 마감된 벽면은 석고보드가 물을 흡수하는 성질이 강하여 습식으로 시공할 경우, 곰팡이가 발생하고 벽 자체가 약해질 수 있기 때문에 건식 이외의 방법은 대안이 없는 실정이다. 또한, 벽면 타일은 벽면에 수직으로 부착되어 타일 자체의 무게뿐만 아니라 연속으로 부착되는 다른 타일들의 전단력을 견뎌야하고 물에도 강해야 하기 때문에 매우 강한 접착력을 요구한다. 따라서, 원룸아파트의 타일 시공은

현재 많은 현장에서 사용하고 있는 건식방법을 채택하여 4장 마감구성재 실험의 마감-C와 동일한 건축자재로 시공하였다. 시공은 석고보드 위에 접착제를 도포하고 그 위에 도자기질 타일을 붙인 후 타일과 타일의 홈에 백색 시멘트를 채웠다. (그림 6.6)은 욕실방수 및 타일 시공과정을 요약한 그림이다.



(그림 6.18) 욕실방수 및 타일 시공

6) 주방타일 시공

주방타일 시공은 욕실 타일시공 방법과 동일하다. 특히 주방 벽은 수전 설치의 편의를 위하여 대부분 석고보드로 벽을 구성하기 때문에 오피스텔과 아파트 시공에서 대부분이 건식방법을 사용한다. (그림 6.7)은 주방타일 시공과정을 요약한 그림이다.



(그림 6.19) 주방타일 시공

7) 도배 시공

도배시공에 사용된 초배벽지와 정배벽지는 4장의 마감-A와 5장의 Mock-Up 실험실 A실 벽과 동일한 건축자재를 사용하였다. 벽지는 완전히 건조할 때 까지 주위의 기류분포를 최소화 하여야 한다. 벽지면 위에 고르지 않은 기류가 흐르게 되면 면마다 건조하는 속도가 달라져, 후에 벽지가 들뜨거나 터지는 등의 하자가 발생한다. 따라서, 벽지가 완전히 건조할 때까지 약 2일간은 환기를 실시하지 않

았다. (그림 6.8)은 도배 시공과정을 요약한 그림이다.



(그림 6.20) 도배 시공

8) 온돌마루 시공

온돌마루 바닥재는 4장의 마감-D 마감구성재와 5장의 Mock-Up 실험실 A실 바닥과 동일한 건축자재를 사용하였다. (그림 6.9)는 온돌마루 시공과정을 요약한 그림이다.



(그림 6.21) 온돌마루 시공

9) 가구 반입

가구는 주방가구와 붙박이장을 설치하였다. 가구를 만드는 재료와 방법에 따라 그 종류가 너무 다양하기 때문에 일반적으로 오피스텔 등에 붙박이용으로 설치되는 제품을 용도에 맞게 주문 제작하였다. (그림 6.10)은 가구반입과정을 요약한 그림이다.



(그림 6.22) 가구 반입

10) 완성된 원룸아파트 내부

(그림 6.11)은 완성된 원룸아파트 내부 모습이다.



(그림 6.23) 원룸아파트 완성

원룸아파트 시공은 2005년 2월 25일에서 시작하여 4월 24일까지 약 2달 동안 진행되었다. 실험은 각 시공과정별로 실내공기오염물질 변화에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 시점마다 총 10차례에 걸쳐 실시하였다. 실험방법은 실내공기질 공정시험방법에 따라 실내를 최소 30분간 환기하고 5시간 동안 밀폐 한 후 정밀 측정법으로 측정하였다. 실험 대상실은 거실과 욕실로 하였으며, 단계별 시공 및 실험 후에는 환기시스템 및 자연환기를 이용하여 실내가 지속적으로 환기되도록 하였다. 실내의 온도조건은 문 시공 전까지 자연실온 상태에서 측정하였으며, 문 시공 이후부터 난방을 실시하여 측정하였다. <표 6.1>은 각 시공과정별 실험일정이다.

<표 6.7> 원룸아파트 시공과정별 실험 일정

실험 횟수	실험일자	시공과정	비고
1차	2. 25	철거후	자연실온
2차	3. 15	- 거실 콘크리트양생후 - 욕실 우레탄방수후	
3차	3. 18	욕실주방타일 시공후	
4차	3. 23	초배벽지 시공후	
5차	3. 26	정배벽지 시공후	
6차	3. 30	온돌마루 시공후	
7차	4. 01	온돌마루 양생후	
8차	4. 10	문 시공후	난방개시, 거실과 욕실문 닫은 후 측정, 가구문 열림
9차	4. 17	가구 반입후	
10차	4. 24	시공완료 후	

6.2 원룸아파트 실험결과 분석

<표 6.2>와 <표 6.3>은 시공과정별 거실과 욕실의 폼알데하이드와 TVOC 방출량 변화이다.

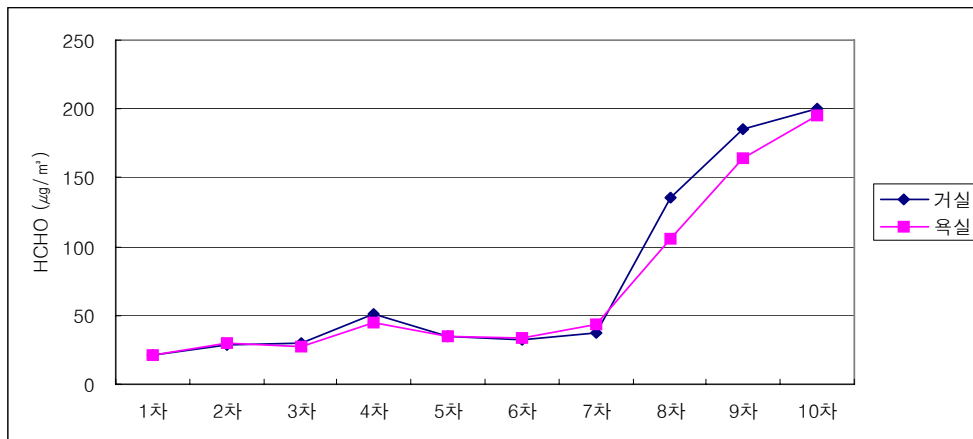
<표 6.8> 거실 시공과정별 HCHO 및 TVOC 방출량 변화

실험 횟수	시공과정	라벨	HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	온도($^{\circ}\text{C}$)	습도(%)
1차	철거후	Liv-225	20.7	799.1	10.0	19.5
2차	콘크리트 양생후	Liv-315	28.6	7710.3	14.0	53.0
3차	주방타일 시공후	Liv-318	29.3	10087.6	15.8	43.0
4차	초배벽지 시공후	Liv-323	51.4	21683.3	17.1	39.0
5차	정배벽지 시공후	Liv-326	34.8	22003.9	16.0	42.0
6차	온돌마루 시공후	Liv-330	32.1	13914.1	16.7	27.0
7차	온돌마루 양생후	Liv-401	37.9	18646.5	17.9	31.0
8차	문 시공후	Liv-410	135.5	17213.7	27.0	43.0
9차	가구 반입후	Liv-417	185.5	14784.4	26.5	16.0
10차	시공완료후	Liv-424	200.7	8878.5	25.3	23.0

<표 6.9> 욕실 시공과정별 HCHO 및 TVOC 방출량 변화

실험 횟수	시공과정	라벨	HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	온도($^{\circ}\text{C}$)	습도(%)
1차	철거후	Bath-225	20.7	778.4	10.0	19.5
2차	우레탄방수후	Bath-315	29.5	9195.2	14.0	53.0
3차	욕신타일 시공후	Bath-318	26.9	20131.2	15.8	43.0
4차	초배벽지 시공후	Bath-323	44.5	27225.1	17.1	39.0
5차	정배벽지 시공후	Bath-326	35.0	23855.6	15.6	44.0
6차	온돌마루 시공후	Bath-330	34.0	17967.5	17.1	28.0
7차	온돌마루 양생후	Bath-401	43.3	22574.4	18.1	34.0
8차	문 시공후	Bath-410	105.2	29293.1	24.2	50.0
9차	가구반입후	Bath-417	163.6	26812.6	25.1	19.0
10차	시공완료후	Bath-424	194.8	24590.6	25.3	24.0

(그림 6.12)는 거실과 욕실의 폼알데하이드 방출량 변화를 나타낸 것이다.



(그림 6.24) 거실과 욕실의 시공과정별 HCHO 방출량 변화

(그림 6.12)에서 보는바와 같이 폼알데하이드의 방출량은 거실과 욕실 모두 1차 실험인 기존 시설 철거 후부터 온돌마루를 시공한 7차 실험까지 약 $52\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 일정한 수준으로 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 4장의 마감구성재 실험에서 마감-A와 마감-D의 폼알데하이드 방출장도가 낮게 나타난 결과와 일치하며, 동일한 건축자재가 시공된 5장의 Mock-Up 실험실 A실과 비교하여 레벨콘의 영향을 제외하면 난방설치 전까지의 결과와 거의 일치한다. 그러나 목재 문을 시공한 8차 실험 이후부터 폼알데하이드의 방출량이 급격히 증가하고 있으며, 대체로 욕실보다 거실의 방출량이 많은 것으로 나타났다.

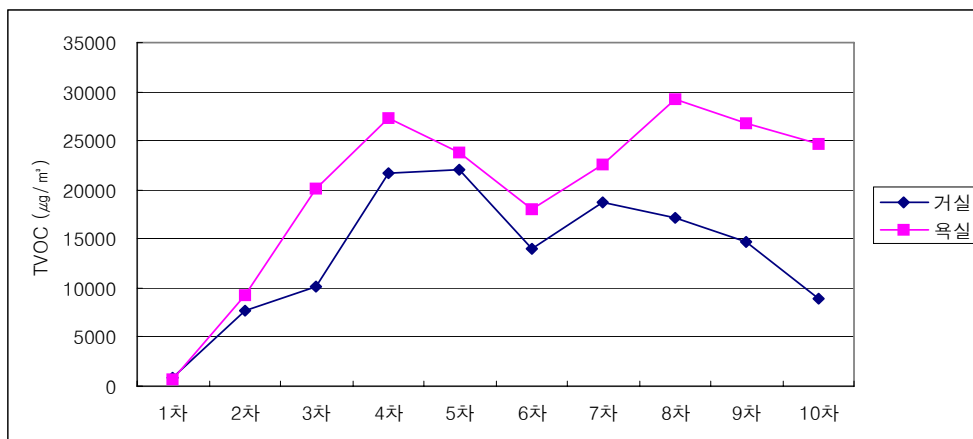
거실을 중심으로 폼알데하이드 방출량 변화를 살펴보면, 4차 실험인 초배벽지 시공에서 $51.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다소 증가하였으며, 이후 5차 실험에서 $34.8\mu\text{g}/\text{m}^3$, 6차 실험에서 $32.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하였다. 그러나 7차 실험인 온돌마루 양생 후에 폼알데하이드가 $37.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다소 증가하였는데, 크로마토그램을 분석한 결과, 폼알데하이드와 함께 같은 알데하이드 계통인 Acetone 또한, 다소 증가하여, 3장의 건축자재 실험, 4장의 마감-D(온돌마루) 실험, 5장의 Mock-Up 실험실 A실의 온돌마루 양생 후의 결과와 동일하게 나타났다. 이와 함께 Mock-Up 실험실 A실의 온돌마루 양생 후의 결과에서 나타나지 않았던 알데하이드 계통인 Butyraldehyde가 욕실에서 다소 크게 나타났는데, 이는 실험 전날에 욕실의 샤워부스 설치에 사용한 투명실리콘이 원인인 것으로 추정된다.

목재 문 시공 후, 문을 닫아 거실과 분리하고, 동시에 난방을 실시한 8차 실험에서 폼알데하이드 방출량이 $135.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 급격하게 증가하였다. 특히, 거실의 방출량이 욕실보다 더욱 높은 것으로 나타났는데, 이는 5장의 Mock-Up 실험실 A실 난방실시 후의 결과에서 나타난바와 같이 난방으로 인하여 온돌마루에서 발생하는 폼알데하이드와 목재 문에서 방출되는 폼알데하이드가 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 크로마토그램 분석 결과, 8차 실험에서 거실의 폼알데하이드와 Acetone이 큰 폭으로 증가하였고, 욕실은 폼알데하이드는 큰 폭으로 증가하였으나, Butyraldehyde는 감소한 것으로 나타났다.

가구를 반입한 9차 실험에서 폼알데하이드 방출량이 $185.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 더욱 급격하게 증가하였다. 크로마토그램 분석 결과, 거실의 폼알데하이드와 Butyraldehyde는 큰 폭으로 증가하였다. 욕실은 폼알데하이드, Acetone, Butyraldehyde가 모두 증가하였다. 5장 Mock-Up 실험실 A실에서 난방 실시 이후 폼알데하이드 방출량이 감소한 결과와 비교하면, 폼알데하이드는 가구에서 다량 방출되고 있음을 알 수 있다. 욕실의 경우, 문을 닫아 거실과 분리하였음에도 가구로 인한 영향이 나타났다.

모든 공사를 완료한 10차 실험까지 폼알데하이드 방출량은 $200.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 계속 증가하였다. 따라서, 실내에서의 폼알데하이드 발생은 가구의 원료인 목재의 영향이 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 시공과정에 따른 폼알데하이드 크로마토그램은 부록 (그림 25)에서 (그림 34)에 나타내었다.

(그림 6.13)은 거실과 욕실의 TVOC 방출량 변화를 나타낸 것이다.

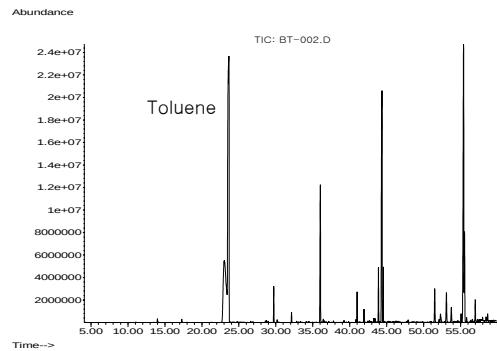


(그림 6.25) 거실과 욕실의 시공과정별 TVOC 방출량 변화

(그림 6.13)에서 보는바와 같이 1차 실험인 기존시설의 철거 후부터 초배벽지를 시공한 4차 실험까지 TVOC 방출량이 지속적으로 증가하고 있다. TVOC 방출량 변화 패턴은 거실과 욕실이 비슷하게 나타나고 있으나, 욕실의 방출량이 더욱 많은 것으로 나타났다.

거실을 중심으로 TVOC 방출량 변화를 살펴보면, 1차 실험에서부터 5장의 Mock-Up 실험과 달리, TVOC 방출량은 $799.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 다중이용시설등의 실내공기질관리법 기준인 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 거실의 콘크리트 바닥 미장과 욕실의 우레탄 방수 시공을 거의 동시에 실시한 후인 2차 실험에서 TVOC 방출량이 $7710.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크게 증가하였는데, 우레탄 방수액에서 발생하는 강한 VOCs가 TVOC 방출량 증가에 큰 영향을 미친 것으로 확인되었다. TVOC 크로마토그램 분석 결과, 욕실에만 우레탄 방수를 시공하였음에도 TVOC 방출량과 크로마토그램 패턴은 거실에서도 거의 동일하게 나타났다.

거실 주방 및 욕실 타일 시공 후인 3차 실험에서 거실의 TVOC 방출량은 $10087.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 증가하였으며, 욕실은 $20131.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 거실보다 2배가 높게 나타났다. 크로마토그램 분석 결과, 욕실 우레탄 방수 시공 후에 나타났던 피크들은 거의 사라진 것을 확인할 수 있었으며, 원룸아파트 3차 실험, 3장의 주방 및 욕실 타일에 사용한 타일접착제 그리고 4장의 마감-C의 크로마토그램에서 모두 동일한 피크가 나타나고 있음을 확인하였다. 따라서, 4장의 마감-C 실험결과와 마찬가지로 실제 시공에 있어서도 타일과 타일 틈 사이로 타일접착제 오염물질이 방출되고 있는 것으로 나타났다. 또한, 타일 시공 후, Toluene 피크가 현저하게 증가하였다. 이는 거실과 욕실 이외의 공간인 전실 바닥을 매우 얇은 플라스틱 계통의 타일로 시공하였는데, 이 때 사용된 타일접착제가 원인인 것으로 판단된다. 전실 타일에 접착에 사용한 접착제의 크로마토그램은 (그림 6.14)와 같으며, 크로마토그램에서 보는바와 같이 전실에 사용한 접착제에서 Toluene이 다량 방출되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 원룸아파트의 TVOC 방출량은 도기질 타일접착제와 플라스틱 타일접착제가 혼합된 형태로 나타난 것으로 판단되며, 타일접착제에서 방출되는 TVOC 방출량은 실내공기에 심각한 영향을 주고 있음을 알 수 있다.



(그림 6.26) 전실 타일 접착제의 TVOC 크로마토그램

초배벽지를 시공한 4차 실험에서도 거실 주방 및 욕실 타일 시공 후에 크게 발생한 오염물질의 영향으로 거실은 $21683.3\mu\text{g}/\text{m}^3$, 욕실은 $27225.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 큰 폭으로 증가하였다. 크로마토그램 분석 결과, 거실 주방 및 욕실 타일접착제의 영향으로 초배 시공 후의 영향은 나타나지 않았다.

정배벽지를 시공한 5차 실험에서 거실은 $22003.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 거의 일정한 수준에서 유지되었으나, 욕실은 $23855.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 큰 폭으로 감소하였다. 크로마토그램 분석 결과, 욕실은 타일접착제에서 방출되는 오염물질의 방출량이 시간이 경과함에 따라 감소한 것으로 나타났으며, 거실 주방 및 욕실 타일 시공의 영향으로 정배벽지의 영향은 나타나지 않았다.

온돌마루를 시공한 6차 실험에서 거실과 욕실 모두 $13914.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $17967.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 방출량이 급격히 감소하였다. 크로마토그램 분석 결과, 이는 5차 실험과 마찬가지로 타일접착제에서 방출되는 오염물질의 방출량이 시간이 경과함에 따라 크게 줄었기 때문인 것으로 나타났다.

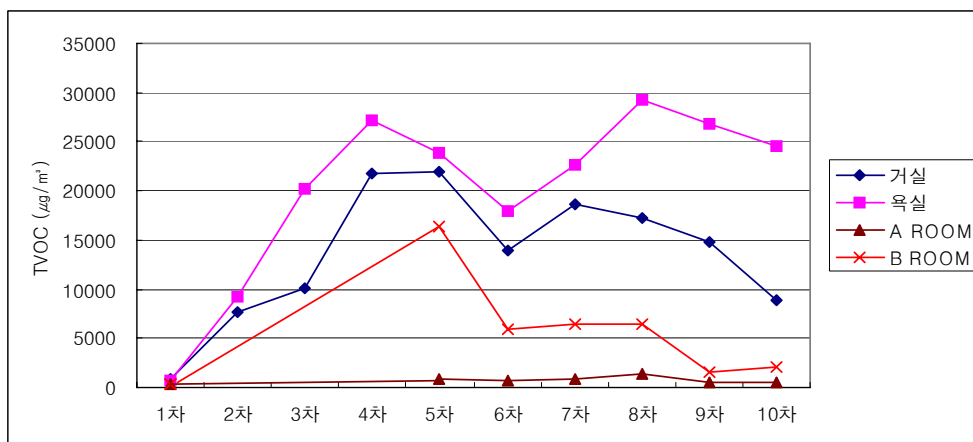
온돌마루 양생 후인 7차 실험에서 거실과 욕실 모두 $18646.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $22574.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다시 방출량이 증가하였는데, 크로마토그램 분석 결과, 시공과정 중 온도, 습도 등의 영향으로 타일접착제의 방출특성이 변화하여 증가한 것으로, 온돌마루의 영향은 아닌 것으로 나타났다.

문을 시공하고 난방을 실시한 8차 실험에서 거실의 방출량은 $17213.75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소한 반면, 욕실의 방출량은 $29293.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 증가하였다. 이는 거실과 욕실을 목재 문으로 분리하였기 때문에, 비교적 시공면적이 큰 욕실 타일접착제에서 발생하는 오염물질이 거실로 이동하지 못하고 욕실 내에 남아 있었기 때문인 것으로 판단되며, 거실은 주방에 시공된 타일의 영향이 나타난 것으로 판단된다. 크

로마토그램 분석 결과, 문 시공 후에는 5장의 Mock-Up 실험실 B실과 같이 Toluene 피크가 증가함과 동시에 두꺼워지는 현상이 나타나기 시작하였다. 이는 목재 문 제작에 사용된 접착제가 원인으로 추정된다.

실내에 불박이장과 주방가구를 반입한 후인 9차 실험에서 거실과 욕실 모두 $14784.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $26812.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 방출량이 감소하였으며, 시공 완료인 10차 실험에서 $8878.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $24590.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 특히, 거실과 욕실을 목재 문으로 분리하여 거실의 방출량 감소가 매우 크게 나타났다. 9차 실험과 10차 실험의 TVOC 크로마토그램 분석 결과, 시간이 경과함에 따라 욕실 타일에서 방출되는 오염물질은 점차 감소하고 있는 반면, Toluene 방출량이 크게 증가한 것으로 나타났다. 특히, Toluene 피크가 5장의 Mock-Up 실험실 B실에서 나타났던 피크 끝부분이 갈라지고 두꺼워지는 현상이 두드러지게 나타났는데, 이 현상으로 볼 때, 가구 제작에 PIB를 주원료한 접착제를 사용한 것으로 추정되며, 따라서, 목재 접착제가 원인인 것으로 판단된다. 따라서, 가구는 폼알데하이드 뿐만 아니라 TVOC 증가에도 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 시공과정에 따른 TVOC 크로마토그램은 부록 (그림 35)에서 (그림 44)에 나타내었다.

(그림 6.15)는 5장의 Mock-Up 실험실 A실과 B실의 결과와 원룸아파트의 결과를 비교하여 나타낸 것이다.



(그림 6.27) Mock-Up 실험실과 원룸아파트의 TVOC 방출량 비교

원룸아파트는 5장의 Mock-Up 실험실 A실과 동일한 제품으로 실내를 마감했

음에도 실내의 TVOC 방출량이 현저히 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히, 오염물질 방출강도가 높은 실크벽지로 마감된 Mock-Up 실험실 B실보다도 현저히 높게 나타나고 있다. 이는 원룸아파트 시공과정 중에 사용한 욕실의 우레탄 방수와 특히, 타일 시공에 사용된 접착제가 원인인 것으로 확인되었다. 4장의 마감-C 타일벽 실험결과에서 살펴보았듯이 타일접착제는 초기 방출강도가 상당히 높고 시간이 경과함에 따라 감소율이 매우 작게 나타난 결과로 보아 원룸아파트에서의 TVOC는 만족할만한 수준으로 감소되기까지 상당한 시간이 필요할 것으로 예상된다.

<표 6.4>와 <표 6.5>는 각각 원룸아파트의 거실과 욕실의 시공과정별 6종 VOCs 방출량 변화를 나타낸 것이다. 6종 VOCs 방출량은 <표 5.4> 공동주택 6종 VOCs의 국외 가이드라인을 기준으로 비교하였다.

<표 6.4>는 거실의 시공과정별 6종 VOCs 방출량을 나타낸 것이다. <표 5.4>의 가이드라인과 비교하여, 시공과정 중의 Benzene, Etylbenzene, Xylene, Styrene은 가이드라인보다 낮은 수준으로 검출되었으며, 이 중 1,4-Dichlorobenzene은 검출되지 않았다. 6종 VOCs 중 가장 많이 검출된 것은 Toluene으로, 최종 실험인 10차 실험에서도 $471.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일본의 가이드라인인 $260\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 만족시키지 못하였다.

<표 6.10> 거실의 시공과정별 6종 VOCs 방출량 변화 (단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

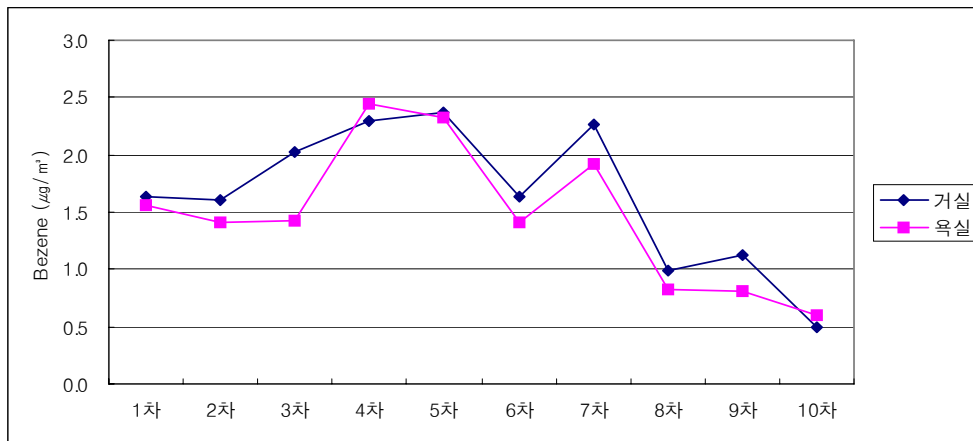
실험 횟수	시공과정	라벨	Benzene	Toluene	Etylben- zene	Xylene	Styrene	1,4-Dic- hloroben- zene
1차	철거후	Liv-225	1.6	147.8	6.3	27.5	0.0	0.0
2차	콘크리트 양생후	Liv-315	1.6	95.5	462.1	1991.4	0.0	0.0
3차	주방타일 시공후	Liv-318	2.0	392.7	110.0	371.2	6.3	0.0
4차	초배벽지 시공후	Liv-323	2.3	287.8	126.6	481.6	10.6	0.0
5차	정배벽지 시공후	Liv-326	2.4	274.7	114.4	486.0	13.6	0.0
6차	온돌마루 시공후	Liv-330	1.6	176.1	54.9	273.5	5.2	0.0
7차	온돌마루 양생후	Liv-401	2.3	229.0	78.5	384.3	9.0	0.0
8차	문 시공후	Liv-410	1.0	307.0	60.8	328.3	19.2	0.0
9차	가구반입후	Liv-417	1.1	1104.2	83.8	370.9	22.3	0.0
10차	시공완료후	Liv-424	0.5	471.0	36.5	197.8	10.0	0.0

<표 6.5>는 욕실의 시공과정별 6종 VOCs 방출량을 나타낸 것이다. <표 5.4>의 가이드라인과 비교하여, Benzene, Etylbenzene, Xylene, Styrene은 가이드라인보다 낮은 수준으로 검출되었고 1,4-Dichlorobenzene은 검출되지 않아, Mock-Up 실험실 A실 및 거실의 결과와 유사하게 나타났다. 그러나 Toluene은 최종 실험인 10차 실험에서 $383.62\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일본의 가이드라인인 $260\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 만족시키지 못하였다.

<표 6.11> 욕실의 시공과정별 6종 VOCs 방출량 변화 (단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

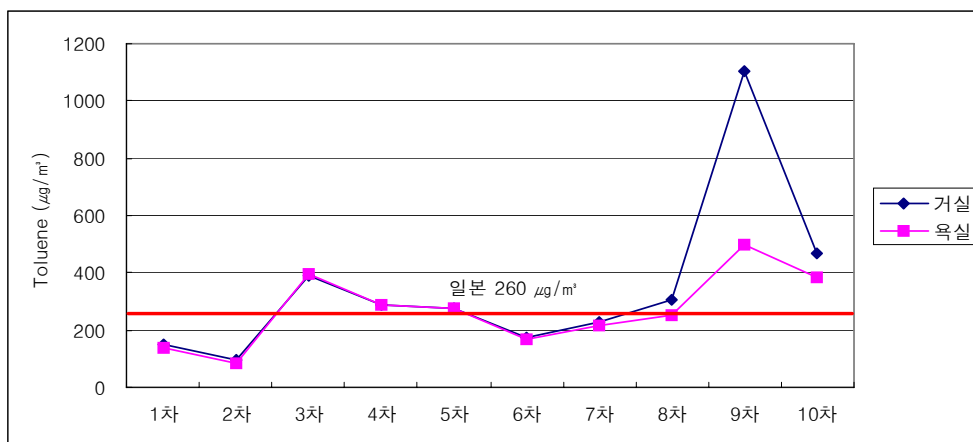
실험 횟수	시공과정	라벨	Benzene	Toluene	Etylben- zene	Xylene	Styrene	1,4-Dic- hloroben- zene
1차	철거후	Bath-225	1.6	140.6	6.0	26.1	0.0	0.0
2차	우레탄 방수후	Bath-315	1.4	85.5	550.7	2318.2	0.0	0.0
3차	욕신타일 시공후	Bath-318	1.4	396.1	142.2	485.6	8.6	0.0
4차	초배벽지 시공후	Bath-323	2.4	286.4	160.0	593.0	12.1	0.0
5차	정배벽지 시공후	Bath-326	2.3	276.7	130.5	541.8	14.5	0.0
6차	온돌마루 시공후	Bath-330	1.4	166.1	69.5	343.7	5.4	0.0
7차	온돌마루 양생후	Bath-401	1.9	216.6	90.4	432.9	10.0	0.0
8차	문 시공후	Bath-410	0.8	249.5	120.7	626.8	18.4	0.0
9차	가구반입후	Bath-417	0.8	496.1	148.0	711.5	27.6	0.0
10차	시공완료후	Bath-424	0.6	383.6	160.4	826.3	18.1	0.0

(그림 6.16)은 Benzene의 시공과정별 방출량 변화를 나타낸 것으로, 거실과 욕실 모두 7차 실험인 온돌마루 양생 후에 급격히 증가하였다가 감소하고 있다. 거실과 욕실 모두 시공과정 중에서 홍콩의 가이드라인 $16.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였다.



(그림 6.28) 거실과 욕실의 시공과정별 Benzene 방출량 변화

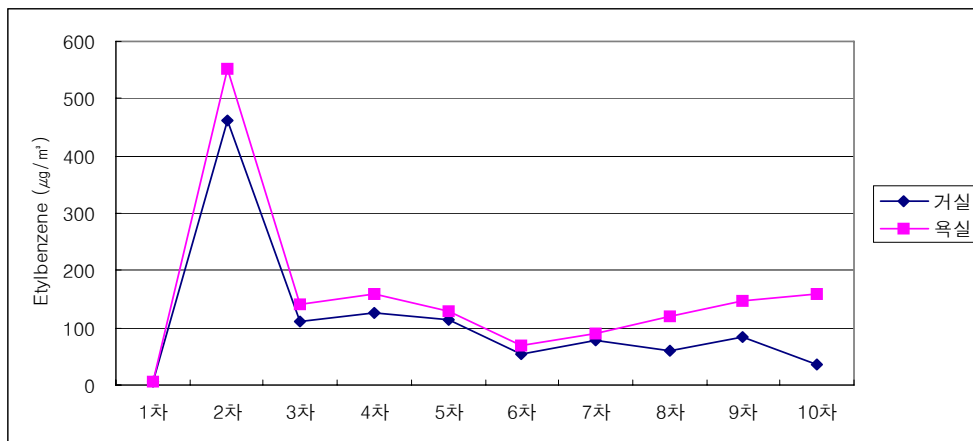
(그림 6.17)은 Toluene의 시공과정별 방출량 변화를 나타낸 것으로, 거실과 욕실 모두 3차 실험인 타일 시공 이후에 가이드라인을 크게 초과하는 것으로 나타났다. 이후 6차 실험인 온돌마루시공까지 감소하다가 다시 증가하였으며, 특히, 거실은 9차 실험인 가구반입 후에 방출량이 크게 증가하였다. 최종 10차 실험에서 욕실과 거실 모두 일본의 가이드라인 $260\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. Toluene의 증가 원인은 타일접착제와 가구인 것으로 나타났다.



(그림 6.29) 거실과 욕실의 시공과정별 Toluene 방출량 변화

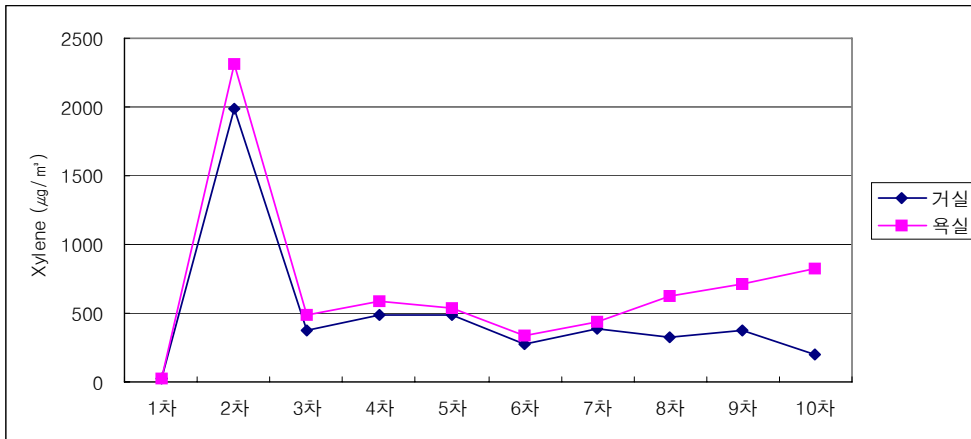
(그림 6.18)은 Etylbenzene의 시공과정별 방출량 변화를 나타낸 것으로, 거실과

욕실 모두 2차 실험인 우레탄 방수 이후 방출량이 크게 증가하였다가 타일 시공 후 감소하여 일정한 방출량을 나타내었다. 이는 우레탄 방수액에서 방출되는 Etylbenzene이 타일 시공으로 인하여 방출면이 가려져 감소한 것으로 판단된다. 욕실은 6차 실험인 온돌마루 시공까지 감소하다가 증가하는 패턴을 보이는 반면, 거실은 감소하는 패턴을 나타내는데, 이는 6차 실험 이후 실내온도가 서서히 상승한 것과 관계가 있는 것으로 판단된다. 즉, 실내의 온도가 높아짐에 따라 욕실에 시공된 우레탄 방수액이 타일의 틈을 통해 방출되는 것으로 판단된다. 거실과 욕실 모두 시공과정 중에서 홍콩의 가이드라인 $1447\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였다.



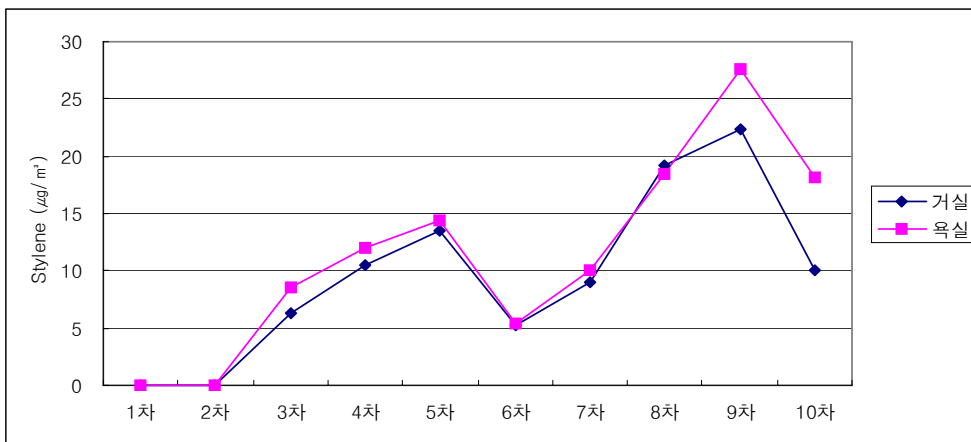
(그림 6.30) 거실과 욕실의 시공과정별 Etylbenzene 방출량 변화

(그림 6.19)은 Xylene의 시공과정별 방출량 변화를 나타낸 것으로, 거실과 욕실 모두 2차 실험인 우레탄 방수 이후 방출량이 크게 증가하였다가 타일 시공 후 감소하였다. 그러나 2차 실험인 우레탄 방수과정에서 홍콩의 가이드라인 $870\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 크게 초과한 것으로 나타났으며, 이후의 방출량 변화는 Etylbenzene과 매우 유사한 패턴을 나타내었다. Xylene 또한, 타일 시공으로 인하여 방출면이 가려져 방출량이 감소한 것으로 판단된다. 최종 10차 실험에서 거실과 욕실 각각 $197.8\mu\text{g}/\text{m}^3$, $826.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모두 일본의 가이드라인 $870\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였으나, 실내 온도가 올라갈 경우 욕실의 방출량은 더욱 증가할 것으로 예상된다.



(그림 6.31) 거실과 욕실의 시공과정별 Xylene 방출량 변화

(그림 6.20)은 Styrene의 시공과정별 방출량 변화를 나타낸 것으로, TVOC 방출량 패턴과 매우 유사하게 나타났다. 1차와 2차 실험에서 거실과 욕실 모두 검출되지 않았고 3차 실험인 타일 시공 이후 방출량이 크게 증가하였다. 이후 6차 실험인 온돌마루 시공 후 크게 감소하였다가 다시 증가하여 9차 실험인 가구반입 후, 다시 큰 폭으로 감소하였다. 거실과 욕실 모두 시공과정 중에서 일본의 가이드라인 $220\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였다. 1,4-Dichlorobenzene은 5장의 실험결과와 같이 검출되지 않았다.



(그림 6.32) 거실과 욕실의 시공과정별 Styrene 방출량 변화

6.3 소 결

실제 공동주택은 사용용도에 따라 여러 개의 실로 구획되며, 다양한 건축자재들이 복합적으로 사용되므로, 단위 세대를 재현한 Mock-Up 실험만으로는 실내 공기오염물질의 정확한 발생원인을 파악하기 어렵다. 따라서 실물 원룸아파트를 건설하여 공동주택 시공 전과정에서의 실내공기오염물질 방출량 변화를 분석함으로써, 벽과 바닥 외 오염물질을 발생시키는 기타 건축자재 및 시공단계를 파악하였다.

- 1) 폼알데하이드는 거실과 욕실이 거의 비슷한 방출량과 패턴을 나타냈으며, 거실이 방출량이 다소 크게 나타났다. 거실을 기준으로 기존 시설 철거 후부터 온돌마루 시공까지 약 $52\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만으로 거의 일정한 수준에서 유지되었으나, 문 시공과 난방을 실시한 후부터는 $135.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 급격하게 상승하여 국내 다중이용시설등의 실내공기질관리법 기준 $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 특히 가구를 반입한 이후 $185.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 증가하였으며, 공사가 완료된 후 $200.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 더욱 증가하여, 실내 폼알데하이드 증가의 주요 원인은 문과 가구로 나타났다. 그러나, 문과 가구는 만드는 재료와 방법에 따라 종류가 매우 다양하기 때문에, 이를 대상으로 한 별도의 연구를 통하여 대책을 마련해야 할 것으로 판단된다.
- 2) TVOC 방출량은 기존시설의 철거 후부터 $799.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 기준 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하지 못하였으며, 거실 주방과 욕실 타일 시공한 후 타일접착제에서 방출되는 오염물질로 인하여 거실과 욕실이 각각 $10087.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $21683.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 급격하게 증가하였다. 이후 공사에서도 타일접착제에서 방출되는 오염물질은 쉽게 감소하지 않아 공사가 최종 완료된 후 거실이 $8878.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 기준을 크게 초과하였으며, 욕실은 $24590.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 거실의 약 2.8배가 되어 타일접착제가 실내 TVOC 증가의 주요 원인으로 나타났다. 따라서, 현재 주로 사용하고 있는 타일접착제를 이용한 건식 타일시공에 대한 시급한 변경이 요구된다. 또한, 문 시공 후에 Toluene 피크가 증가하였고, 가구 반입 후 Toluene 피크가 갈라지고 두꺼워지는 현상이 두드러지게 나타남과 동시에 양이 크게 증가하는 등, 문 시공과 가구 반입 전후의 변화가 뚜렷하게 나타났다. 따라서, 가구는 폼알데하이드 뿐만 아니라 실내의 Toluene을 비롯한 기타 VOCs 증가에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다.

3) 6종 VOCs 방출량 중 Benzene, Etylbenzene, Xylene, Styrene은 홍콩과 일본의 가이드라인보다 낮은 수준으로 검출되었으며, 이 중 1,4-Dichlorobenzene은 시공 전과정에서 검출되지 않았다. 6종 VOCs 중 가장 많이 검출된 것은 Toluene으로 공사가 최종 완료된 후 거실 $471.0\mu\text{g}/\text{m}^3$, 욕실 $383.\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 홍콩과 일본의 가이드라인을 크게 초과하였다.

이상의 실험결과로 실제 공동주택 시공과정에서 실내공기오염에 영향을 크게 미치는 건축자재와 시공방법을 파악하였다. 따라서, 현재 사용하고 있는 타일접착제를 이용한 건식 타일시공방법에 대한 시급한 변경과 함께 이를 대체할 수 있는 시공방법에 관한 후속 연구가 요구되며, 문과 가구의 주원료인 목재와 가공 방법 그리고 제작 방법에 대한 검토를 통하여 대책을 마련해야 할 것으로 판단된다. 특히, 목재 자체는 인체에 유해한 VOCs 외에 자연에서 발생하는 해롭지 않은 VOCs도 다량 포함⁴⁰⁾되어 있으므로 목재에 대한 별도의 측정 방법이 필요할 것으로 판단된다.

또한, 시공과정 중 타일접착제에서 발생하는 오염물질이 매우 크게 나타나 타일시공 이후에 기타 시공과정에서 나타나는 오염물질 변화는 나타나지 않았으므로, 향후 타일시공을 제외한 다른 시공과정을 정밀하게 검토할 필요가 있다.

40) 산림청 국립산림과학원 실험결과 보도자료

제 7 장 결 론

최근 신축공동주택에서의 실내공기질 문제가 심각하게 대두되어 건물병증후군(Sick Building Syndrome : SBS) 및 새집증후군(Sick House Syndrome : SHS)과 같은 국민건강을 위협하는 사회적 문제로 발전하고 있다. 신축공동주택에서의 실내공기질 문제는 건축자재에서 발생하는 폼알데하이드와 TVOC가 주된 원인으로 알려져 있다. 따라서, 대량으로 건설되는 공동주택의 특성상, 부적절한 건축자재의 선정과 공법으로 인한 피해는 일반 건물과 비교하여 매우 심각하게 나타난다.

이러한 공동주택의 실내공기질 문제를 조속히 해결하기 위해서는 일반시민, 민간단체, 학계, 산업계, 정부 등이 공동으로 참여하여 기술적, 제도적 측면에서 노력을 기울여야 한다. 특히, 학계는 건축, 보건, 화학 등 다양한 분야의 전문가가 서로 협동하여 문제의 원인과 해결방안을 모색하여야 한다. 이 중 가장 우선적으로 선행되어야 할 과제는 실내공기오염물질의 원인인 건축자재의 특성을 파악하는 것으로, 건축자재 분류체계를 설정하여 오염물질 데이터베이스를 마련하는 것이다. 이와 함께, 벽과 바닥과 같은 여러 건축자재들의 조합으로 이루어진 건축부위의 오염물질 방출특성을 파악하고, 건축시공 전반에 걸쳐 시공과정 및 방법에 대한 검토가 필요하다.

본 연구는 공동주택에 사용되는 건축자재와 시공과정에서 발생하는 실내공기오염물질의 발생원인과 방출특성을 파악하여, 공동주택의 실내공기질 개선 방안을 마련하기 위한 기초 연구로서 연구 결과는 다음과 같다.

1) 건축자재 종류별 오염물질 방출 특성

국내에서 생산되는 건축자재의 폼알데하이드와 TVOC 방출 실태를 파악하기 위하여 건축자재 100종을 대상으로 종류별, 성분별로 분류하여 방출강도를 시험하였다.

시험 결과, 폼알데하이드 방출강도의 경우, 벽지는 실크벽지 > 초배벽지 > 종이벽지 순으로 낮게 나타났으며, 접착제는 목재용 > 타일접착용 > 벽지접착용 > PVC 및 바닥판 접착용 순으로 낮게 나타났고, 바닥재는 온돌마루 > 립바닥

재 순으로 낮게 나타났다. 시험한 모든 건축자재에서 폼알데하이드 방출강도는 낮게 나타나 폼알데하이드에 대한 과소평가가 우려된다. 따라서 국내 건축자재의 특성과 인체 위해성을 함께 고려한 폼알데하이드의 등급 개선이 요구된다. TVOC 방출강도의 경우, 벽지는 실크벽지 > 종이벽지 > 초배벽지 순으로 낮게 나타났으며, 접착제는 타일접착용 > 목재용 > PVC접착용 > 바닥판접착용 > 벽지접착용 순으로 낮게 나타났고, 바닥재는 림바닥재 > 온돌마루 순으로 낮게 나타났다. 이 중 실크벽지는 다중이용시설등의실내공기질관리법에서 사용을 금지하고 있는 TVOC 방출강도 $4\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 이상인 제품이 26개 중 5건 나타났다, 접착제는 Acryl을 주성분으로 하는 타일접착용에서 TVOC 방출강도 $10\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 를 초과하는 제품이 4개 중 3건 나타났다. 또한, PIB를 주성분으로 목재접착용은 모든 제품이 TVOC 방출강도 $10\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 를 초과하는 것으로 나타났다.

2) 건축자재 마감구성에 따른 방출강도 특성

공동주택의 벽과 바닥과 같은 건축부위는 여러 건축자재의 조합으로 구성되기 때문에 이로 인하여 방출특성이 변화한다. 따라서 건축자재 방출강도 시험결과와 종류별 특징을 바탕으로 건축자재를 선정하고, 실제 시공방법과 동일하게 마감구성재를 제작하여 방출강도를 실험하였다.

실험 결과, 폼알데하이드 방출강도는 7일차를 기준으로 타일벽 > 온돌마루 > 종이벽지 > 림바닥재 > 실크벽지 순으로 방출강도가 낮게 나타났다. TVOC 방출강도는 20일차를 기준으로 타일벽 > 림바닥재 > 실크벽지 > 온돌마루 > 종이벽지 순으로 방출강도가 낮게 나타났으며, 건축자재 종류에 따라 뚜렷한 차이가 있었다. 또한, 건축자재의 마감구성재 내 위치에 상관없이 방출강도가 높은 건축자재에 따라 마감구성재의 방출강도가 결정되었으며, 단위 면적당 중량이 크고, 방출강도가 높은 마감구성재는 시간경과에 따른 감소율도 작아 실내공기에 오랜 시간 동안 영향을 주는 것으로 나타났다.

3) 마감구성재 Mock-Up 비교 실험

마감구성재 오염물질 방출 실험은 엄격히 통제된 실험실 조건에서 수행한 것으로, 실제 공동주택에 시공되었을 때는 온도, 습도, 기류, 환기 등의 조건으로

인하여 차이가 나타날 수 있다. 따라서, 공동주택의 단위 공간인 침실과 거실 또는 기존 공동주택의 리모델링을 가정한 두 개의 Mock-Up 실험실에 TVOC 방출강도가 낮은 재료(A실)와 높은 재료(B실)를 적용하여 오염물질 방출량 차이를 비교하였다.

실험결과, 폼알데하이드 방출량은 시공 40일 경과 후, A실과 B실이 각각 $76.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $22.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 다중이용시설등의 실내공기질관리법 기준인 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였다. TVOC 방출량은 시공 40일 경과 후, A실은 $528.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 기준 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 근접하게 나타났으나, B실은 $2004.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 기준 4배가 넘는 것으로 나타났으며, 6종 VOCs 방출량 또한 바닥재 설치 이후 Toluene이 $593.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 급격히 증가하여 홍콩과 일본 등의 가이드라인 기준을 만족하지 못하였다. 따라서, 공동주택의 실내공기질 개선은 비용을 추가하거나 특별한 기술을 적용하기 전에 오염물질 저방출 건축자재 사용이 우선 선행되어야 함을 확인하였다.

4) 원룸아파트 시공 전과정에 따른 오염물질 방출량 분석

실제 공동주택은 다양한 건축자재들이 복합적으로 사용되고 있으므로 일부 건축자재만 적용한 Mock-Up 실험만으로는 정확한 실내공기오염물질의 발생원인을 파악하기 어렵다. 따라서, 실물 원룸아파트를 건설하여 공동주택 시공 전과정에서의 실내공기오염물질 방출량 변화를 분석함으로써, 실내공기오염물질이 발생하는 기타 건축자재 및 시공단계를 파악하였다.

실험 결과, 시공 초기의 폼알데하이드 방출량은 대체로 낮게 거실과 욕실이 비슷한 방출량과 패턴으로 나타났다. 그러나 문 시공과 난방 실시 후 $135.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 급격하게 상승하여 국내 기준 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였으며, 가구를 반입하고 공사가 완료된 후 $200.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크게 증가하였다. 따라서 실내 폼알데하이드 증가는 목재를 원료로 한 문과 가구 시공단계가 주요 원인으로 나타났다.

TVOC 방출량은 기존시설의 철거 후부터 $799.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 국내 기준 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하지 못하였으며, 거실 주방과 욕실 타일 시공한 후 타일접착제에서 방출되는 오염물질로 인하여 거실과 욕실이 각각 $10087.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $21683.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 급격하게 증가하였다. 공사가 최종 완료된 후에도 거실은 $8878.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 국내 기준을 크게 초과하였으며, 욕실은 $24590.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 거실의 약 2.8배가 되었다. 크로마토그램 분석 결과, 실내 TVOC 증가의 주요 원인은 타일접착제로

나타났다. 또한, 문 시공과 가구반입 후 Toluene이 크게 증가하여, 가구는 폼알데하이드 뿐만 아니라 VOCs 증가에도 큰 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 6종 VOCs 중 가장 많이 검출된 것은 Toluene으로 공사가 최종 완료된 후 거실 $471.0\mu\text{g}/\text{m}^3$, 욕실 $383.\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 홍콩과 일본의 가이드라인을 크게 초과하였다.

따라서, 타일접착제를 이용한 건식 타일시공방법에 대한 시급한 변경과 함께 이를 대체할 수 있는 시공방법에 관한 후속 연구가 요구된다. 또한, 문과 가구의 주원료인 목재와 목재의 가공 방법 그리고 제작 방법에 대한 검토를 통하여 대책을 마련해야 할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서는 시공과정 중 타일접착제에서 발생하는 오염물질이 크게 나타나 타일시공 이후 시공과정에서 나타나는 오염물질 변화는 나타나지 않았으므로, 향후 타일시공을 제외한 다른 시공과정을 정밀하게 검토할 필요가 있다.

이상 공동주택에 사용되는 건축자재와 시공과정 중에서 다량의 실내공기오염물질이 발생하는 원인을 실험을 통하여 밝혀내었으며, 향후 본 연구결과를 고려하여 건축설계와 시공이 이루어진다면 공동주택의 건강한 실내공기질을 유지하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 추후 공동주택의 실내공기질을 더욱 향상시키기 위해서는 다음의 연구가 이루어져야 할 것이다.

- 종류별, 용도별, 성분별 건축자재 실내공기오염물질 데이터베이스 구축
- 오염물질 저방출 가구 재료 및 제작방법 개발
- 내장 타일시공방법을 포함한 실내공기오염물질 저방출 건축시공방법 개발
- 축매, 바이오세라믹 등 실내공기질 개선 제품에 대한 검증
- 건축자재 실내공기오염물질 방출량을 고려한 세대 환기량 산정
- 유지관리를 고려한 공동주택용 환기시스템 개발

참 고 문 헌

[국내 논문]

- 김만구 외, 왁스청소에 기인한 실내공기 중 휘발성 유기화합물의 농도변화, 한국대기보전학회지, 제13권 제3호, pp.220~229, 1997
- 김만구 등, 왁스청소에 기인한 실내공기 중 휘발성유기화합물의 농도변화, 한국대기보전학회지, 제13권 제3호, pp. 221~229, 1991
- 김신도 외, 바닥재료에서 발생하는 VOCs와 폼알데하이드의 방출특성 및 방출강도 평가, 대한건축학회 학술발표논문집, 22권 2호, 2002
- 김신도 외, 가구에서 발생하는 VOCs와 Formaldehyde의 방출특성에 관한 연구, 한국대기보전학회 추계학술대회논문집, pp.163~164, 2001
- 김영민 외, 대구지역 공중이용시설의 실내공기질 특성(Ⅱ)-방향족 유기 화합물, 춘계 대기보전학술 대회, 요지집, 1996
- 김영민 외, 대구지역 일반실내환경 중 VOC 농도, 대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문초록집, pp. 348-351, 1995
- 김윤신, 서울시 일부 지하철 역내 대기오염물질에 대한 조사연구, 한국위생학회지, 제19권 제1호, 1994
- 김윤신, 우리나라 실내공기오염현황과 대책, 공기조화 냉동공학, 제 19권 제 6호, 1990
- 김은수 외, 공동주택 실내마감구성재 사용에 따른 실내공기질 예측, 대한건축학회 학술발표논문집, 24권 2호, 2004
- 김창남 외, 실내공기 중의 개별 VOC 농도변화에 관한 측정연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 24권 2호, 2004
- 김태연, 오염물질 발생원의 실내공기질에 관한 기여율 해석, 대한건축학회 논문집, 20권 5호, 2004
- 류용희 외, 공동주택 실내공기질 측정을 통한 현황 및 환기량과 자재종류에 따른 실내공기질 예측, 대한건축학회 학술발표논문집, 24권 1호, 2004
- 박진철, 주거건축물의 실내공기환경 개선에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 19권 6호, 2003
- 박진철 외, 건축재료에서의 실내공기오염물질 발생농도 측정연구, 한국건축설비학회지, 창간호, pp. 126-137, 1998
- 방정현 외, 실내 마감 페인트에서의 휘발성유기용제 및 폼알데하이드의 발생강도

측정연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 18권 1호, 1998

- 배일오 외, 건축자재 폼알데하이드 및 휘발성유기화합물질 방출특성에 관한 연구, 대한건축학회학술발표논문집, 24권 1호, 2004
- 백성옥 외, 고속도로 터널내부 공기 중 휘발성 유기화합물의 농도측정, 한국대기보전학회지, 제14권 제1호, 1998
- 송정한 외, 대구지역 공중이용시설의 실내공기 중 휘발성유기화합물의 농도(방향족과 카르보닐계 화합물을 대상으로), 대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문초록집, pp344-347, 1995
- 신혜수 외, 실내외 공기중 휘발성 유기화합물(VOCs)의 농도조사에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 제9권 제4호, pp310-390, 1993
- 유형규 외, 신축공동주택에서의 실내공기오염물질방출 저감 프로세스에 관한 연구, 설비공학 논문집, 제 17 권 제 5 호, 2005
- 이상형, 기존 공동주택의 실내공기환경에 관한 연구, 중앙대학교 석사학위논문, p.9, 1995
- 이성재 외, 패시브 측정법을 이용한 신축공동주택의 실내공기질 측정, 대한건축학회 학술발표논문집, 24권 2호, 2004
- 전정윤 외, 서울시 주택내 휘발성 유기화합물 공기오염농도의 계절변화에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 21권 3호, 2005
- 전정윤 외, 겨울철 주택내 유기화합물 공기오염농도에 관한 측정연구, 대한건축학회 논문집, 20권 5호, 2004
- 하권철, 실내사무환경에서의 환경성담배연기중 일부 휘발성유기화합물에 관한 연구, 한국환경위생학회지, 제 27권 제3호, 2001
- 황윤정 외, 대구지역 공중이용시설의 실내공기질 특성(Ⅲ)-카르보닐 화합물, 춘계 대기보전학술 대회, 요지집, 1996

[국내 보고서]

- 김갑수 외, 서울시 지하철 환경개선 방안 연구, 서울특별시 지하철 시공, 1998
- 김신도 외, 저 VOCs 배출 천연도료의 개발, KICT2001 산학연 공동연구개발사업 연구보고서, 2002. 6
- 김신도 외, 실내공간 실내공기오염 특성 및 관리방법 연구, 환경부, 2002
- 김신도 외, T-Profect 적용마감구성재에 대한 실내 VOCs 오염물질의 방출특성 및

제어방안, 삼성물산(주) 건설부문, 2001

- 김신도 외, 지하철구간의 환경관리방안 및 오염도 저감에 관한 연구, 건설교통부, 2000
- 김신도 외, 실내공간의 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs) 특성 파악 및 제어방안에 대한 기초조사, 환경부 보고서, 2000. 12
- 김신도 외, 휘발성 유기화합물질 규제대상 설정 및 관리방안에 관한 연구, 환경부, 1997
- 김신도 외, 실내 악취물질 제거 공기정화기술 개발, 삼성전자, 1996
- 김윤신, 서울시내 대형 백화점의 공기질 조사에 관한 연구, 녹색생명운동, 보고서, 1995
- 김윤신 외, 서울시내 대형 백화점의 공기질조사에 관한 연구, 한국일보사 환경운동연합 녹색생명운동, 1995
- 김윤신 외, 지하공간개발에 따른 환경기준 연구, 건설교통부, 1999
- 김윤신 외, 실내공기질 관리방안에 관한 연구, 환경부, 1999
- 윤동원 외, 오염물질 방출 건축자재 선정관련연구, 환경부, 2003
- 윤명조 외, 지하공기질의 허용기준 설정 및 최적 측정을 위한 조사 연구, 환경부, 1997
- 공중이용시설 실내환경 관리방안 연구, 보건사회부, 보고서, 1993
- 서울시 지하철 환경개선 방안 연구, 서울특별시 지하철공사, 보고서, 1998
- 실내공간의 VOCs 특성 및 제어방안에 대한 기초조사, 환경부, 보고서, 2001
- 지하생활공간 공기오염 저감방안 연구, 서울특별시, 1997
- 서울시 지하철내 환경기준 설정 및 환경관리방안에 관한 연구, 서울특별시 지하철공사, 보고서, 1992

[기 타]

- 김무한 외, 건축재료학, 문운당, 2000
- 김윤신, 실내환경과학, 민음사, 1994
- 윤영선 외, 실내건축재료학, 광문각, 2002
- 한화진, 선진국의 VOC 규제 및 관리동향, 첨단환경기술 7월호, pp.2-9, 1997
- 21세기 실내공기환경의 질 세미나 발표집, 대한건축학회, 1998
- 건축재료, 대한건축학회, 기문당, 1997

- 국제공기청정심포지움 '99 자료집, 한국공기청정협회, 1999
- 대기환경과 휘발성 유기화합물질, 한국대기보전학회, 1998
- 실내공기질공정시험방법, 환경부고시 제2004-80호, 환경부, 2004. 6. 5
- 실내 VOCs 토론회 자료집, 한국공기청정협회, 2000
- 지하생활공간공기질관리법시행령, 환경부, 2003
- 제17회 공기청정 기술 세미나 '2000 자료집, 한국공기청정협회, 2000
- 한화진, 국내 VOCs 관리의 최근동향 및 전망, 첨단환경기술 7월호, pp 50- 55, 1998
- VOC 방지기술 세미나, 한국정보기술원, 1996

[국외 논문]

- A. Afshari, Emission of phthalates from PVC and other materials, Indoor Air, Vol.14 pp120-128, 2004
- A. Afshari et al., Comparison of three small chamber test methods for the measurement of VOC emission rates from paint, Indoor Air, Vol.13 pp156-165, 2003
- A. T. HODGSON et al., Volatile Organic Compound Concentrations and Emission Rates in New Manufactured and Site-Built Houses, Indoor Air, Vol.10 pp178-192, 2000
- Bjorn Lundgren et al., Materials Emission of Chemicals - PVC Flooring Materials, Indoor Air, Vol.9 pp202-208, 1999
- Bluysen, P. M. et al., European Indoor Air Quality Audit Project in 56 Office Buildings, Indoor air, v.6 no.4, pp.221-238, 1996
- Bruce A. Tichenor et al., Organic Emissions from Consumer Products and Building Materials to the indoor Environment, JAPCA, Vol. 38, No.3, pp.264-268, 1988
- Chang, John C.S. et al., Substrate Effects on VOC Emissions from a Latex Paint, Indoor air, v.7 no.4, pp.241-247, 1997
- De Aquino Neto, F. R. et al., Assessment of indoor and outdoor TVOC in a renovated office in Rio de janeiro, Brazil, Indoor air quality and climate, pp.352-357, 1999

- Doyun Won et al., Sorptive Interactions between VOCs and Indoor Materials, *Indoor Air*, Vol.11 pp246-256, 2001
- Edward C Moretti, Reduce VOC and HAP emissions, *Chemical Engineering Progress*, 2002
- Hai Guoa, Emissions of total volatile organic compounds from pressed wood products in an environmental chamber, *Building and Environment*, 2001
- Hal Levin, Building Materials and Indoor Air Quality, State of the Art Reviews pp.667-693, *Occupational Medicine* 1989.10
- H. N. Knudsen et al., Sensory and chemical characterization of VOC emissions from building products, impact of concentration and air velocity, *Atmospheric Environment*, pp.1217-1230, 1999
- Horn, W. et al., VOC Emissions from Cork Products for Indoor Use, *Indoor air*, v.8 no.1, pp.39-46, 1998
- Jack Namiesnik et al., Indoor Air Quality, Pollutants, Their Sources and Concentration Levels, *Building and Environment* Vol.27, No.3, pp.339-356, Pergamon Press, London, 1992
- Jan F. Vanderwal et al., The Influence of Temperature on the Emission of Volatile Organic Compounds from PVC flooring, Carpet, and Paint, *Indoor Air*, Vol.7 pp215-221, 1997
- J. L. Niu, Setting up the criteria and credit-awarding scheme for building interior material selection to achieve better indoor air quality, *Environment International*, 2001
- John R. Girman, Volatile Organic Compounds and Building Bake-Out, State of the Art Reviews pp.695-712, *Occupational Medicine* 1989.10
- Jutta Begerow et al., Performance of two different types of passive samplers for the GC/ECD-FID determination of environmental VOC levels in air, *Fresenius J Anal Chem*, pp399-403, 1998
- J. Ten Brinke et al., Development of New Volatile Organic Compound (VOC) Exposure Metrics and their Relationship to "Sick Building Syndrome" Symptoms, *Indoor Air*, Vol.8 pp140-152, 1998
- K Levsen et al., Human's Exposure to Benzene and Other Aromatic Hydrocarbons, Indoor and Outdoor Sources, *Indoor Air* 99, Vol.5, pp.312-317, 1999

- L. E. Sparks, Volatile Organic Compound Emissions from Latex Paint –Part 1. Chamber Experiments and Source Model Development, Indoor Air, Vol.9 pp10-17, 1999
- L. Fang et al., Impact of Temperature and Humidity on Chemical and Sensory Emissions from Building Materials, Indoor Air, Vol.9 pp193-201, 1999
- L. Molhave et al., Total Volatile Organic Compounds(TVOC) in Indoor Air Quality Investigations, Indoor Air, pp.225-240, 1997
- L. Pommer et al., Class separation of buildings with high and low prevalence of SBS by principal component analysis, Indoor Air, Vol.14 pp16-23, 2004
- Markus Reitzig et al., VOC Emissions after Building Renovations: Traditional and Less Common Indoor Air Contaminants, Potential Sources, and Reported Health Complaints, Indoor Air, Vol.8 pp91-102, 1998
- Martin A. Cohen et al., Indoor/ Outdoor Measurements of Volatile Organic Compounds in the Kanawha Valley of West Virginia, JAPCA, Vol.39, No.8, pp.1086-1093, 1989
- Michael R. Van Winkle et al., Volatile Organic Compounds, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Elements in the Air of Ten Urban Homes, Indoor Air, Vol.11 pp49-64, 2001
- M. Rehwagen et al., Seasonal cycle of VOCs in apartments, Indoor Air, Vol.13 pp283-291, 2003
- P. Wolkoff, Trends in Europe to reduce the indoor air pollution of VOCs, Indoor Air, Vol.13 (Suppl. 6) pp5-11, 2003
- Renata Wiglus, The effect of temperature on the emission of formaldehyde and volatile organic compounds (VOCs) from laminate, Building and Environment, pp 41-44, 2002
- Rikke Bramming Jorgensen, Introduction of a Ink-Diffusion Model to Describe the Interaction between Volatile Organic Compounds(VOCs) and Material Surfaces, Indoor Air, Vol.10 pp27-38, 2000
- Rikke Bramming Jorgensen et al., Chamber Testing of Adsorption of Volatile Organic Compounds (VOCs) on Material Surfaces, Indoor Air, Vol.9 pp2-9, 1999
- Rikke Bramming Jorgensen et al., Chamber testing of adsorption of Volatile Organic Compounds(VOCs) on material surfaces, Indoor Air, Vol.9 pp.2-9, 1999
- S. K. Brown, Chamber Assessment of Formaldehyde and VOC Emissions from

Wood-Based Panels, Indoor Air, Vol.9, pp209-215, 1999

- S. K. Brown, Chamber assessment of formaldehyde and VOC emissions from wood-based panels, Indoor Air, Vol.9 pp.209-215, 1999
- Tamura, H. et al., Evaluation of VOC Emissions from Clean room Materials Using New Chamber Test Methods, Institute of Environmental Sciences and Technology, pp.385-390, 1998
- T. Salthammer, Emission of Volatile Organic Compounds from Furniture Coatings, Indoor Air, Vol.7 pp189-197, 1997
- X. Yang et al., A mass transfer model for simulating VOC sorption on building materials, Atmospheric Environment, pp1291-1299, 2001
- X. Yang et al., Effects of Environmental and Test Conditions on VOC Emissions from "Wet" Coating Materials, Indoor Air, Vol.11 pp270-278, 2001
- Zhishi Guo et al., Estimation of the rate of VOC emissions from solvent-based indoor coating materials based on product formulation, Atmospheric Environment, pp 1205-1215, 1999

[국외 보고서, 기타]

- 일본규격협회, 소형챔버법[JIS A 1901], 2003
- ACGIH, Advances in Air Sampling, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Lewis Publishers Inc., U.S.A., 1990
- ASHRAE Standards 62-1989, Ventilation for acceptable indoor air quality, ASHRAE, Atlanta, 1989
- Air Quality Guideline for Europe 2nd Edition, WHO, 2001
- ENV, European Prestandard ENV 13419-1, 13419-2, 1999
- Exposure Guidelines for Residential Indoor Air Quality, Minister of Supply and Services, Environmental Health Directorate, Canada, 1989
- Godish T, Indoor Air Pollution Control, Third printing, Michigan : Lewis Publishers, p.47, 1991
- Hays, S.M. et al., Indoor Air Quality : Solutions and Strategies, Mc Graw-Hill, Inc. New York, p.1, 1995
- International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness,

ASHRAE, 1992

- Jonathan M. Samet et al., Indoor Air Pollution, The Johns Hopkins Univ. Press, U.S.A., 1991
- Mission of the European Communities, European Concerted Action, Indoor Air Quality and Its Impact on Man, Report No.11, Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings, Office for Publications of the European Communities, Luxembourg, 1992
- P.Ole Fanger, New Principles for a Future Ventilation Standard, The 5th International Conference on Indoor Air and Climate, Toronto Canada, 1990
- Susanne V. Hering, Air Sampling Instruments, American Conference of Governmental Industrial Hygienists Inc., U.S.A., 1989
- U.S. Environmental Protection Agency. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment. Carcinogen Assessment Group, Office of Health and Environmental Assessment, 1986
- William P.L. Carter, Dongmin Luo, Irina L. Malkina, and John A. Pierce, Environmental Chamber studies of atmospheric Reactivities of volatile Organic compounds. Effects of Varying Chamber and Light Source, U.S. Statewide Air Pollution Research Center, 1995
- William P.L. Carter et al., Environmental Chamber Data Base for Evaluation Oxidant Mechanisms, U.S. EPA Research Triangle Park, Vol1, 1993

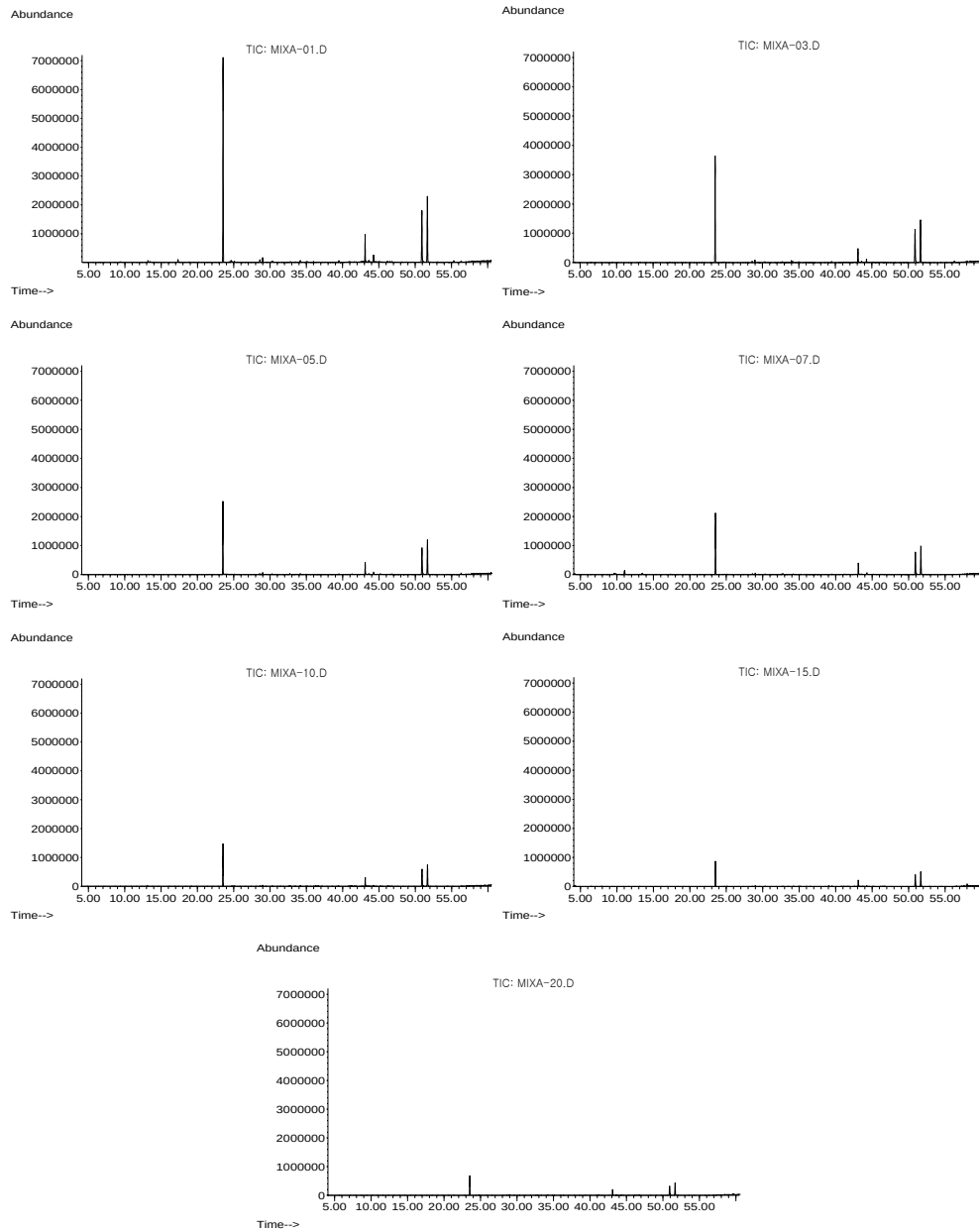
[Web Site]

- <http://kaca.or.kr/>
- http://kosis.nso.go.kr/cgi-bin/sws_999.cgi
- <http://www.auric.or.kr/>
- <http://www.chosun.ac.kr/~ynchun/lecture/air%20pollution/homework/materials/aldehyde.htm>
- <http://www.me.go.kr/>
- <http://www.nier.go.kr/>
- <http://www.who.dk/air/Activities>

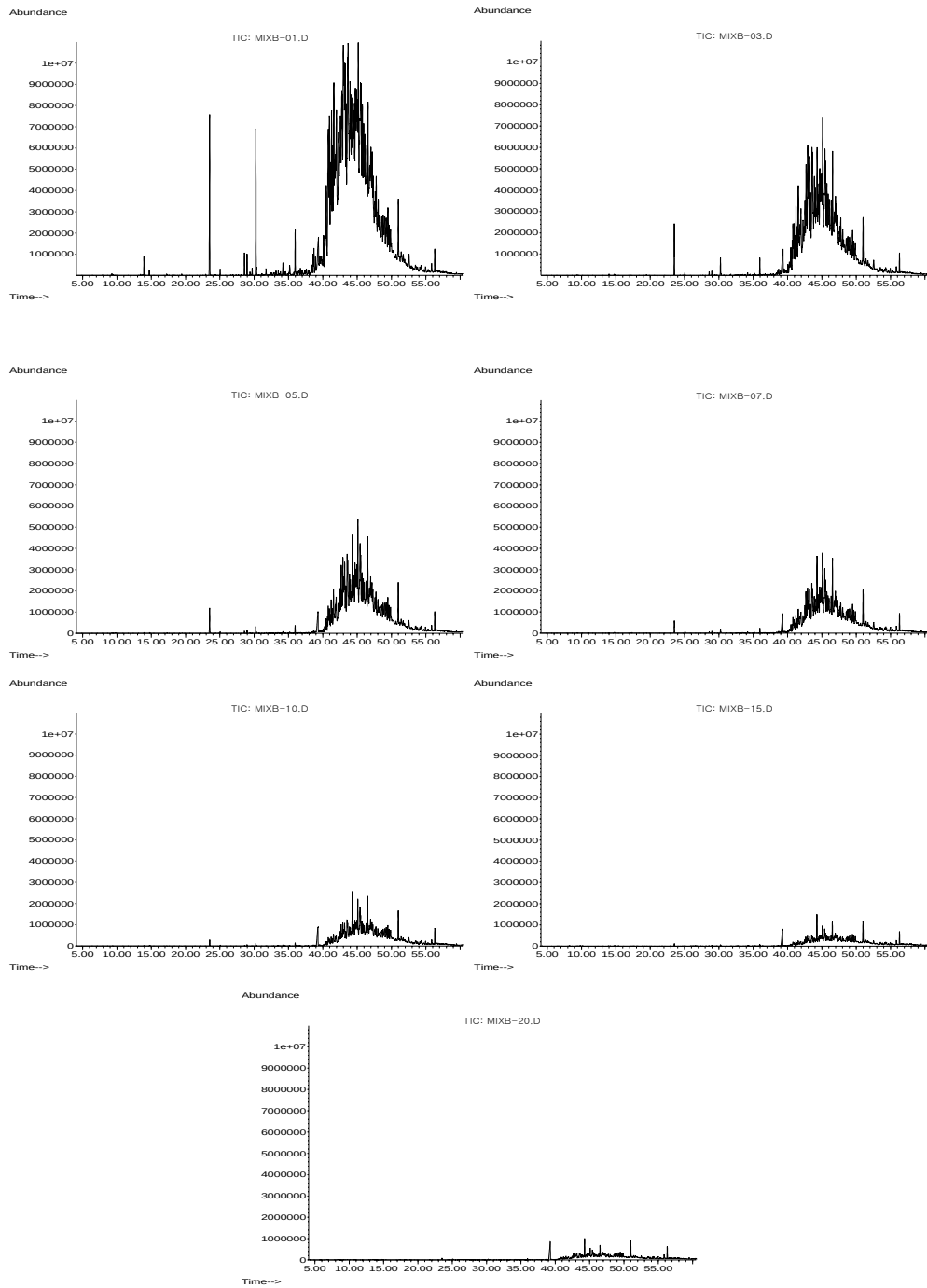
부 록

1. 마감구성재 크로마토그램

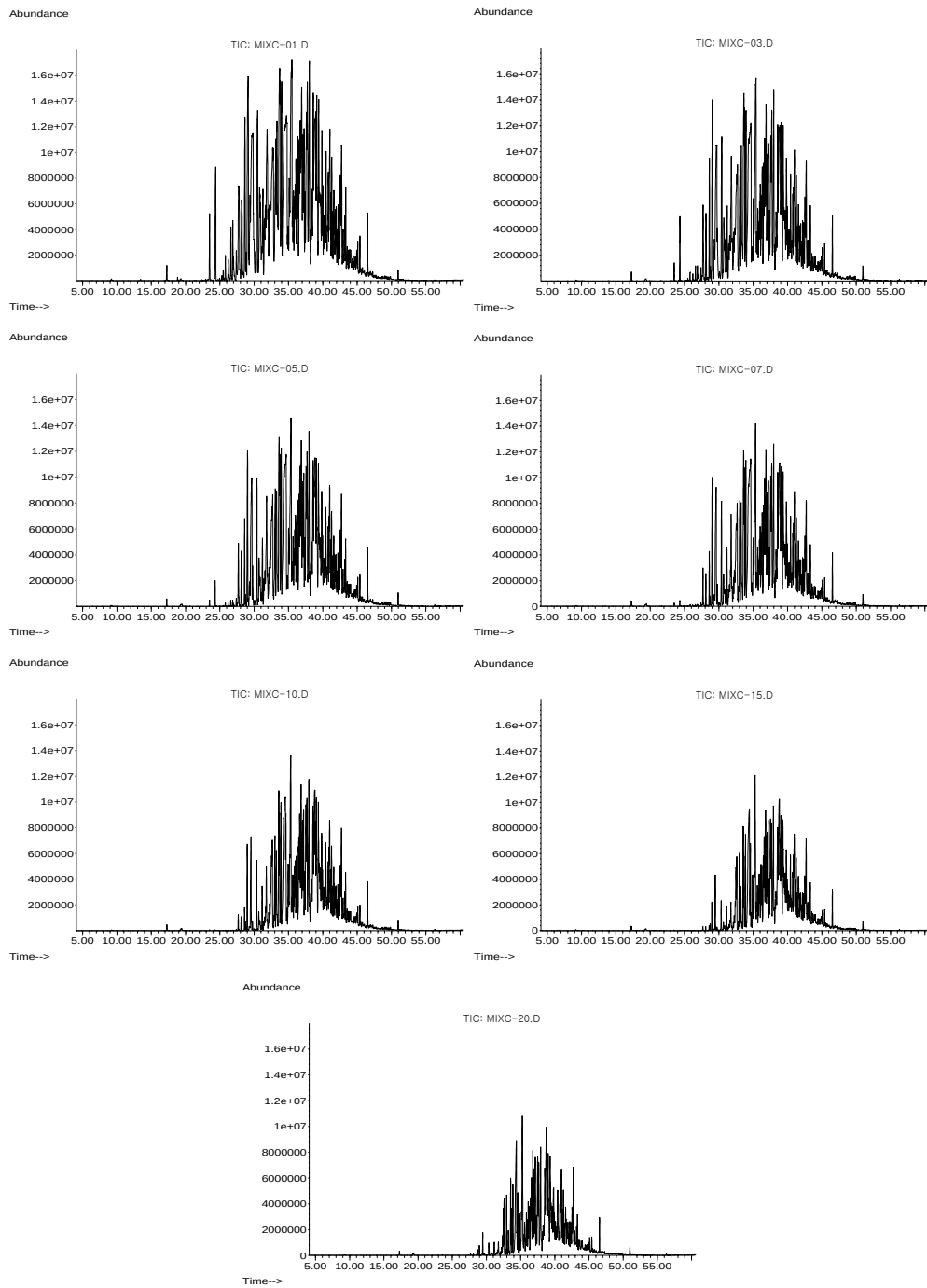
1.1 시간경과에 따른 TVOC 크로마토그램



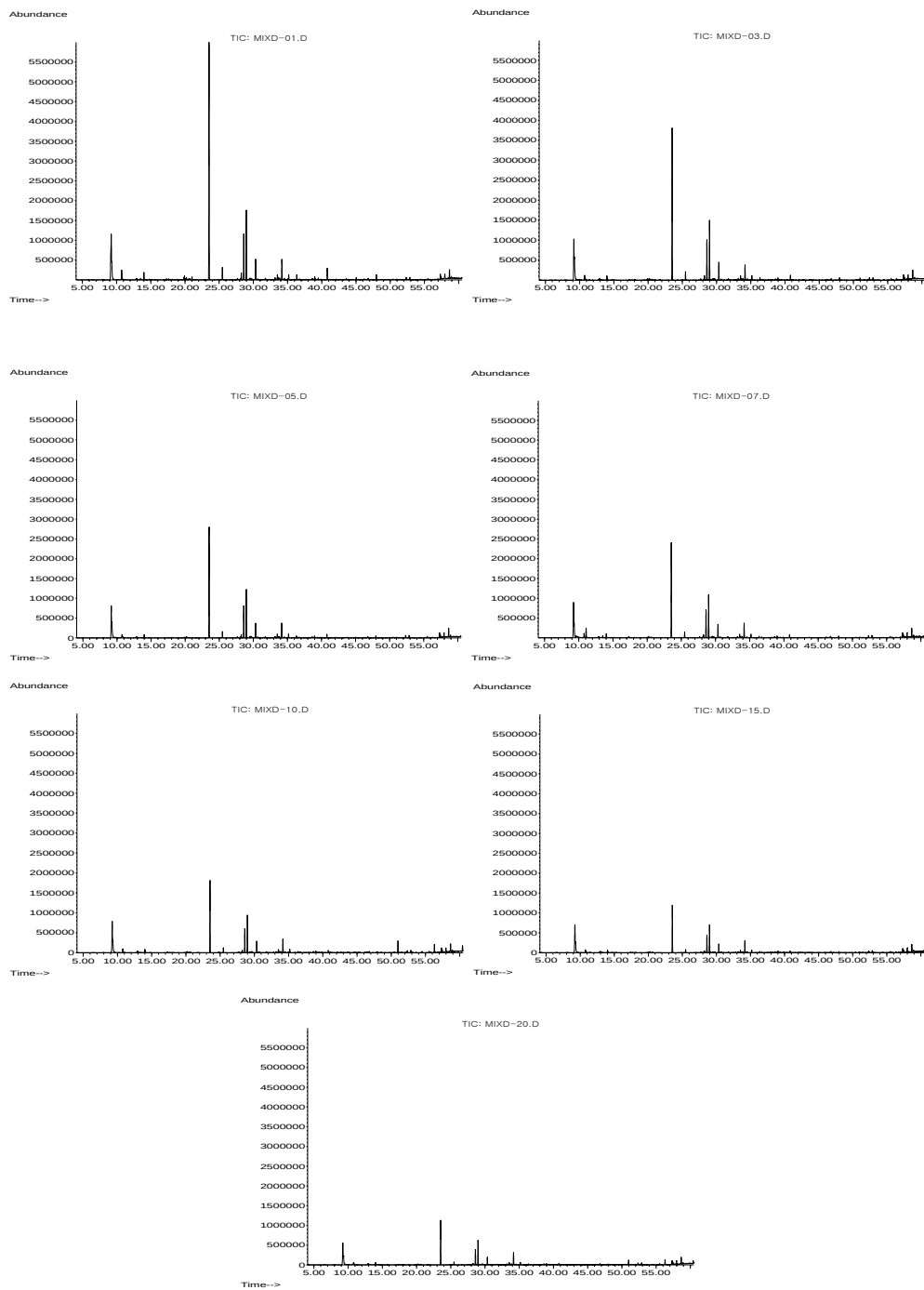
(그림 1) 마감-A(종이벽지)의 시간 경과에 따른 TVOC 크로마토그램 변화



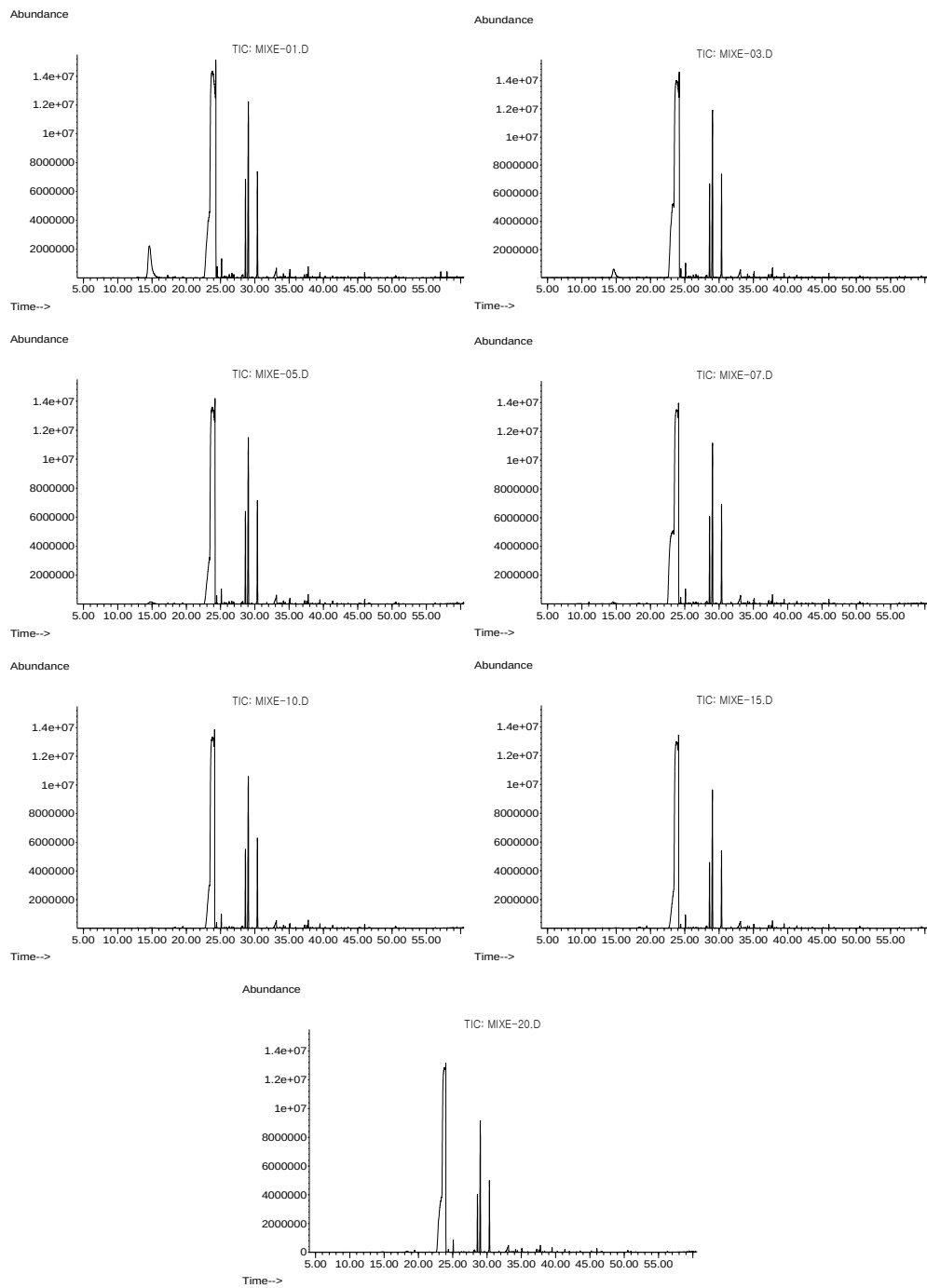
(그림 2) 마감-B(실크벽지)의 시간 경과에 따른 TVOC 크로마토그램 변화



(그림 3) 마감-C(타일벽) 시료의 시간 경과에 따른 크로마토그램 변화



(그림 4) 마감-D(온돌마루) 시료의 시간 경과에 따른 크로마토그램 변화



(그림 5) 마감-E(룸바닥재) 시료의 시간 경과에 따른 크로마토그램 변화

1.2 마감구성재 최대 피크 5개 물질 정성물질

<표 1> 마감-A(종이벽지) 20일차 크로마토그램 5개 최대 피크 물질

R.T.	물질명	Quality	비 고
23.522	Toluene	91	
43.105	2-(2-butoxyethoxy)-Ethanol	90	
50.930	2-[13C]-CYCLOHEXA-2-EN-1-OL	42	Unknown
51.686	2-methyl-Propanoic acid 2-ethyl-3-hydroxyhexyl ester	91	
56.304	Pentadecane	94	

<표 2> 마감-B(실크벽지) 20일차 크로마토그램 5개 최대 피크 물질

R.T.	물질명	Quality	비 고
39.266	2-ethyl-Hexanoic acid	94	
44.273	2-Propanoic acid 6-methylheptyl ester	90	
46.518	Tridecane	97	
50.983	Tetradecane	97	
56.308	Pentadecane	98	

<표 3> 마감-C(타일벽) 20일차 크로마토그램 5개 최대 피크 물질

R.T.	물질명	Quality	비 고
34.319	Decane	97	
35.221	1,2,3-trimethylbenzene	94	
37.466	3-methyl-Decane	97	
37.915	4-ethyl-1,2-dimethyl-Benzene	91	
38.749	Undecane	95	

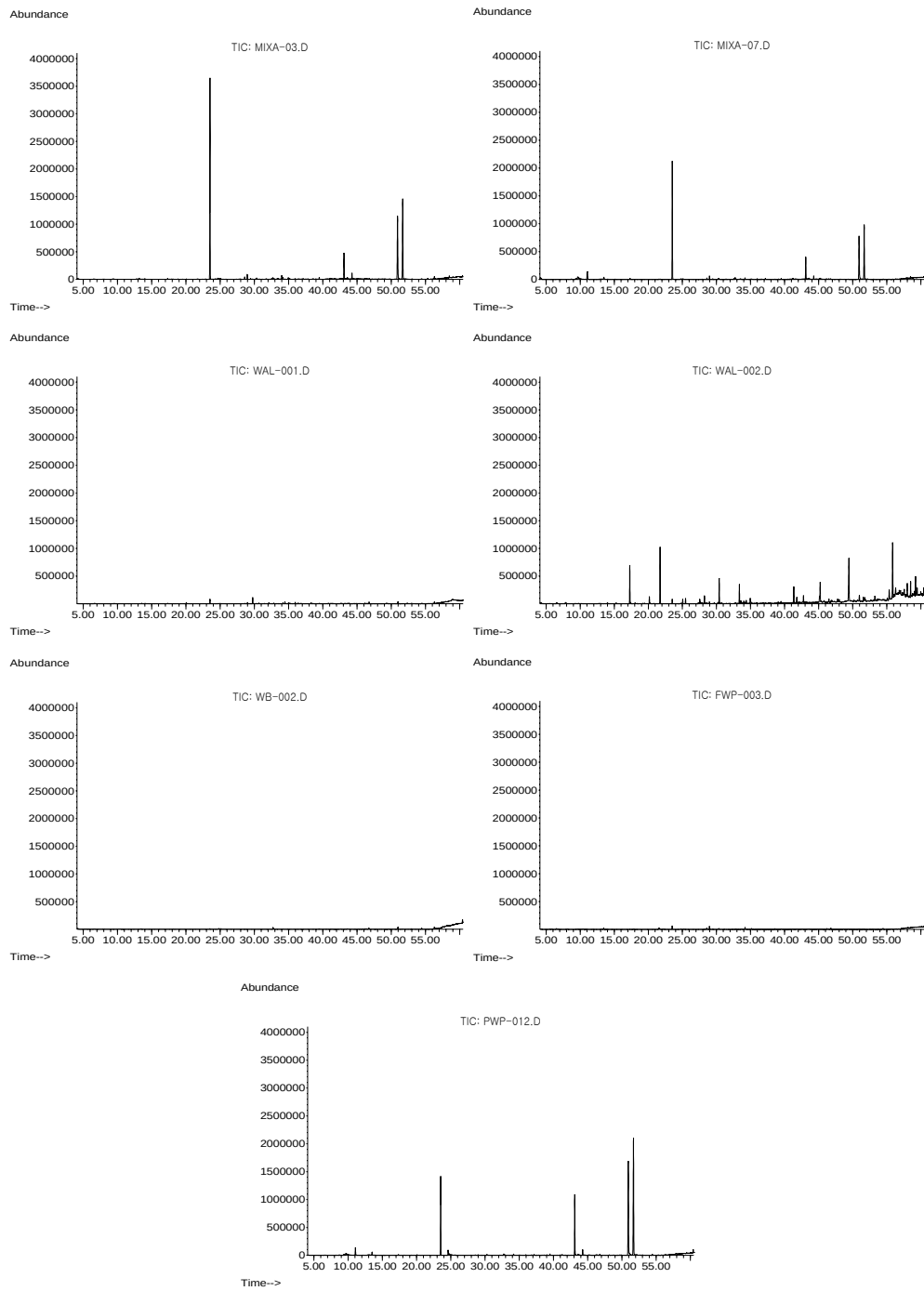
<표 4> 마감-D(온돌마루) 20일차 크로마토그램 5개 최대 피크 물질

R.T.	물질명	Quality	비 고
9.182	Isopropyl Alcohol	86	
23.443	Toluene	91	
28.585	Etylbenzene	91	
28.971	m,p-Xylene	97	
34.158	Benzaldehyde	95	

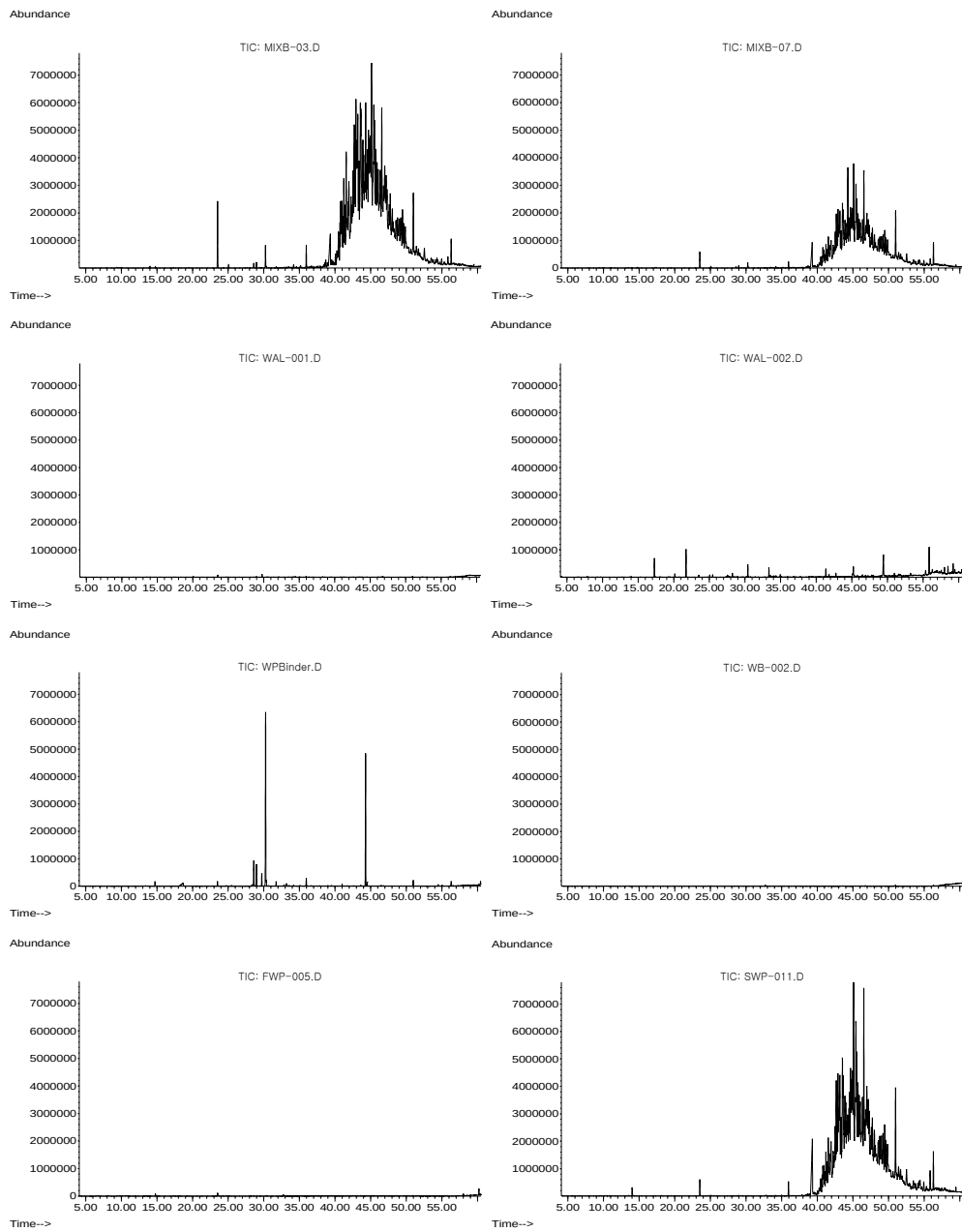
<표 5> 마감-E(룸바닥재) 20일차 크로마토그램 5개 최대 피크 물질

R.T.	물질명	Quality	비 고
23.443	Toluene	94	
28.585	Etylbenzene	91	
28.971	m,p-Xylene	97	
30.352	o-Xylene	97	
33.111	Hexanoic acid	90	

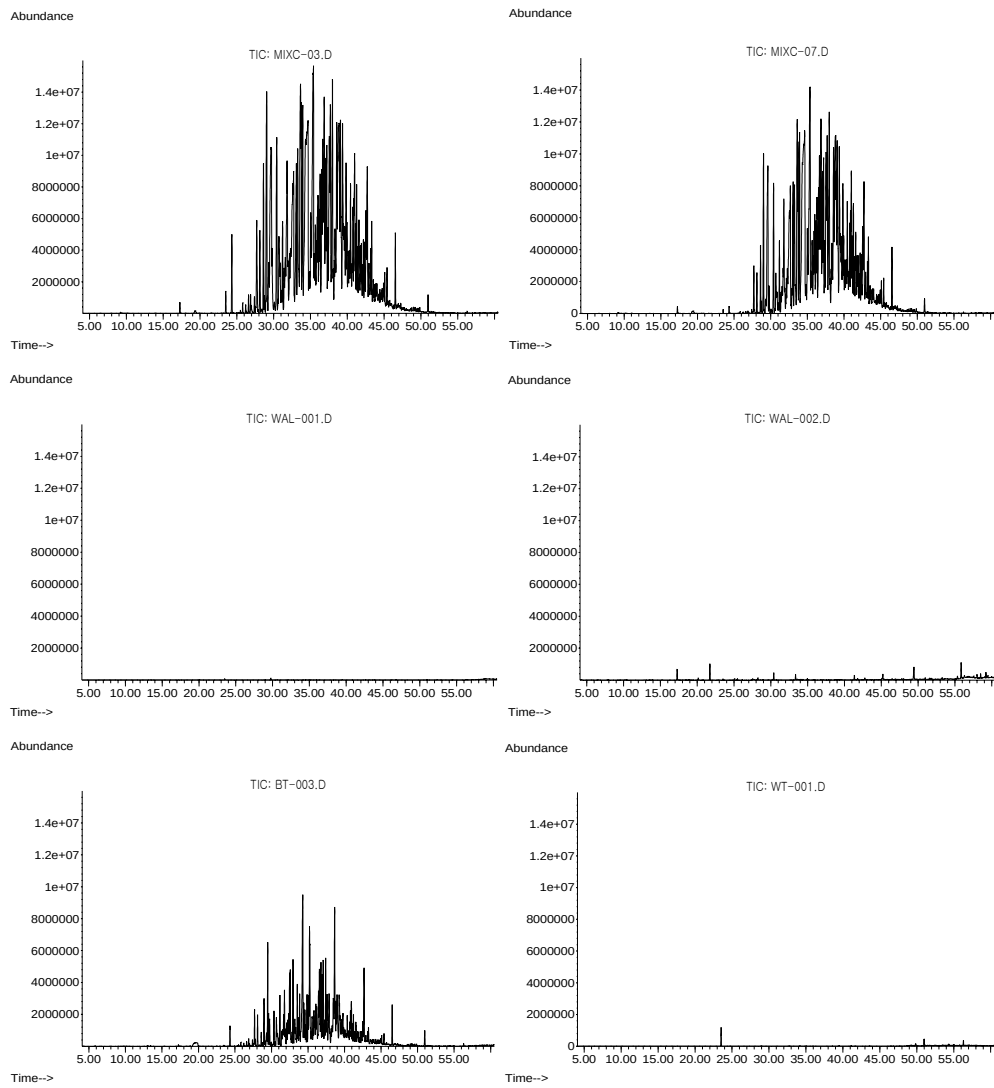
1.3 마감구성재 및 개별 구성제품 크로마토그램 비교



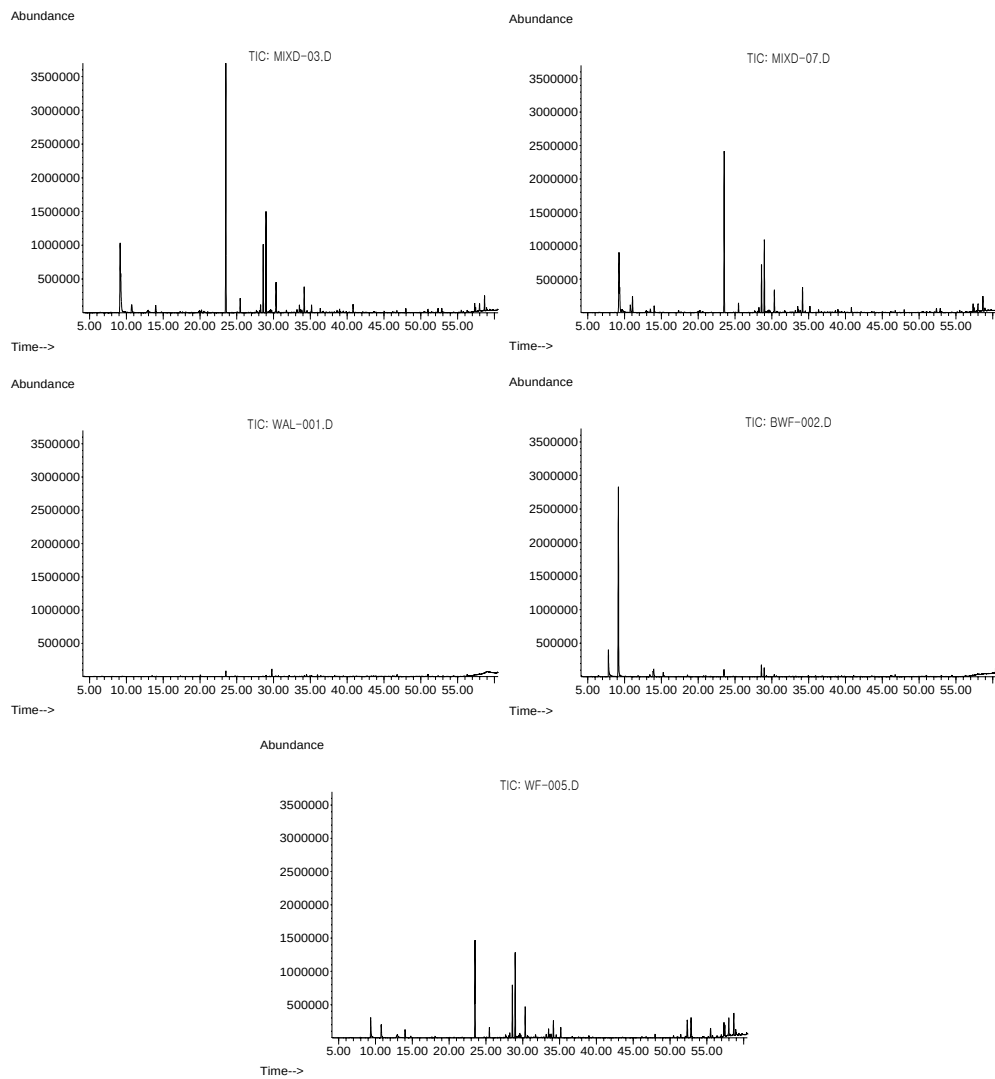
(그림 6) 마감-A(종이벽지) 시료를 구성하는 재료의 크로마토그램 비교



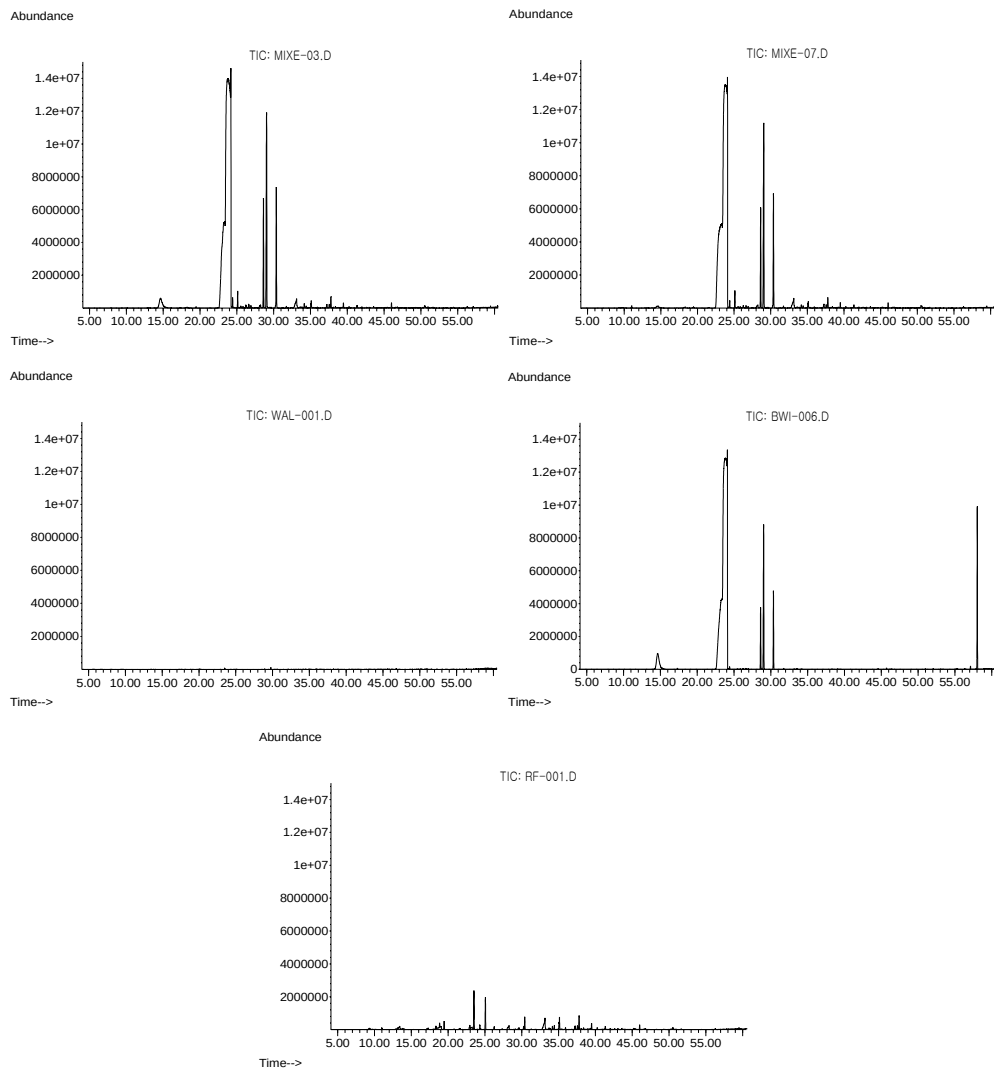
(그림 7) 마감-B(실크벽지) 시료를 구성하는 재료의 크로마토그램 비교



(그림 8) 마감-C(타일벽) 시료를 구성하는 재료의 크로마토그램 비교



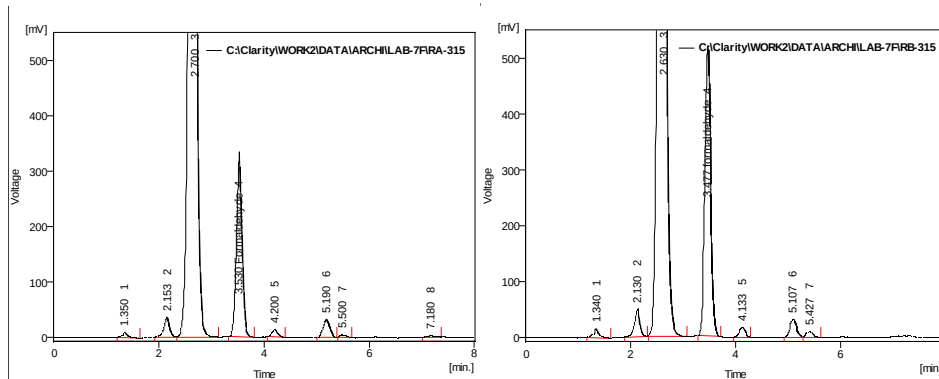
(그림 9) 마감-D(온돌마루) 시료를 구성하는 재료의 크로마토그램 비교



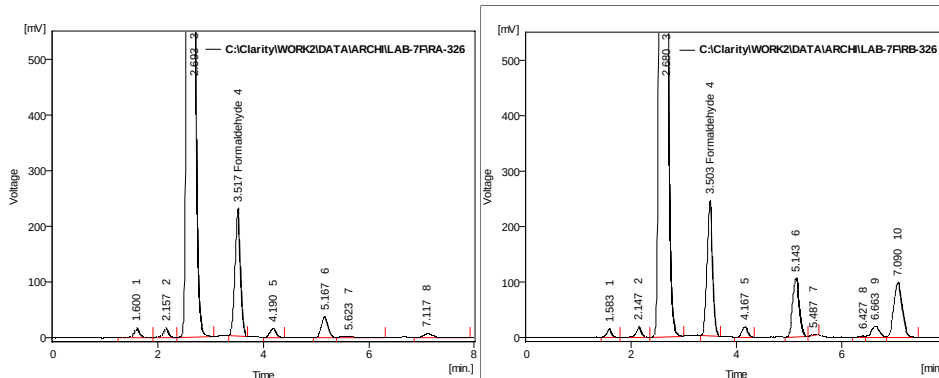
(그림 10) 마감-E(룸바닥재) 시료를 구성하는 재료의 크로마토그램 비교

2. Mock-Up 실험실 시공단계별 크로마토그램

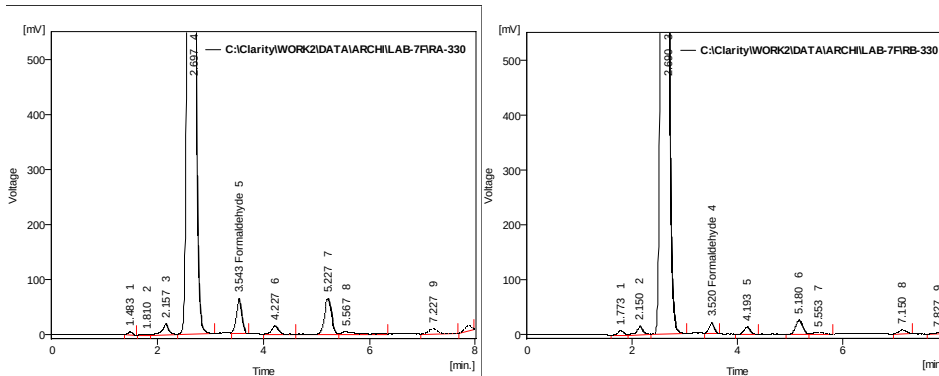
2.1 폼알데하이드 크로마토그램



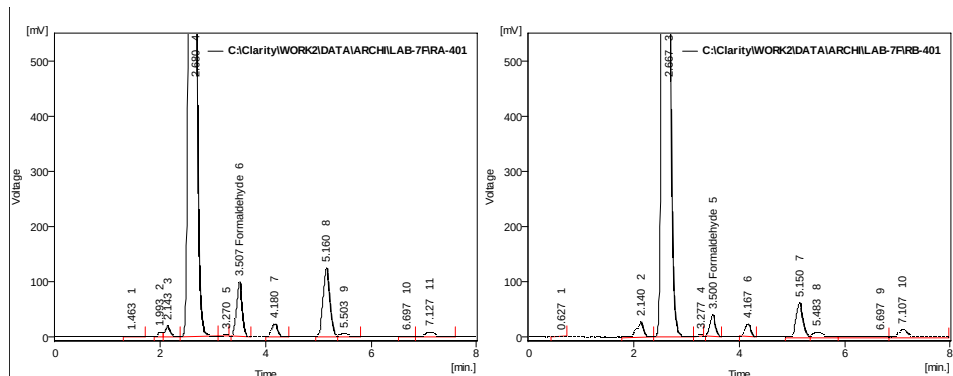
(그림 11) 벽체 및 바닥시공 후 A, B실의 HCHO 크로마토그램



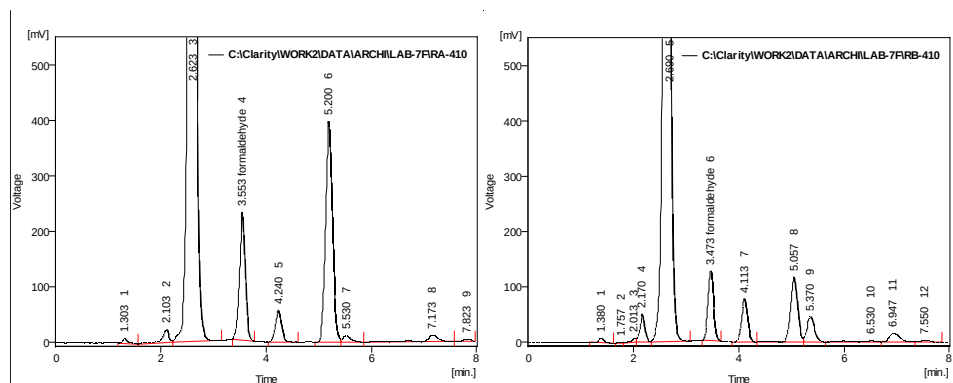
(그림 12) 도배시공 후 A, B실의 HCHO 크로마토그램



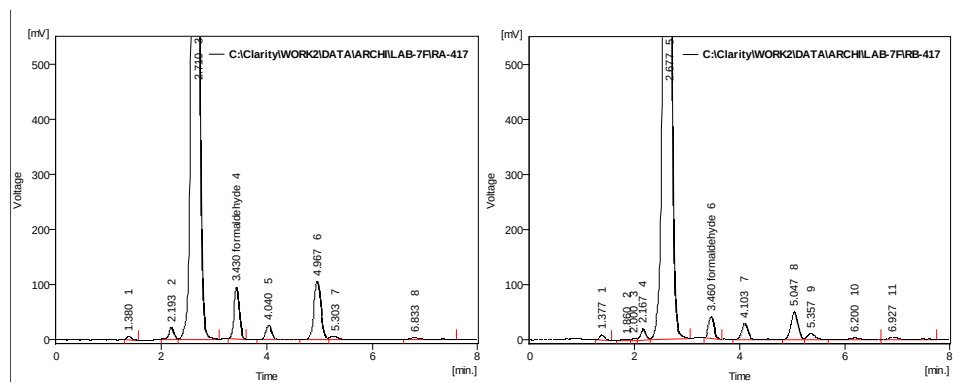
(그림 13) 바닥시공 1일 후 A, B실의 HCHO 크로마토그램



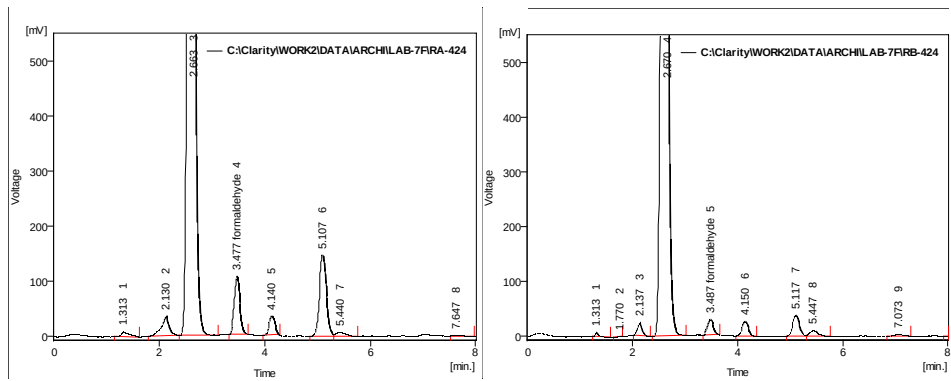
(그림 14) 바닥시공 3일 후 A, B실의 HCHO 크로마토그램



(그림 15) 난방실시 후 A, B실의 HCHO 크로마토그램

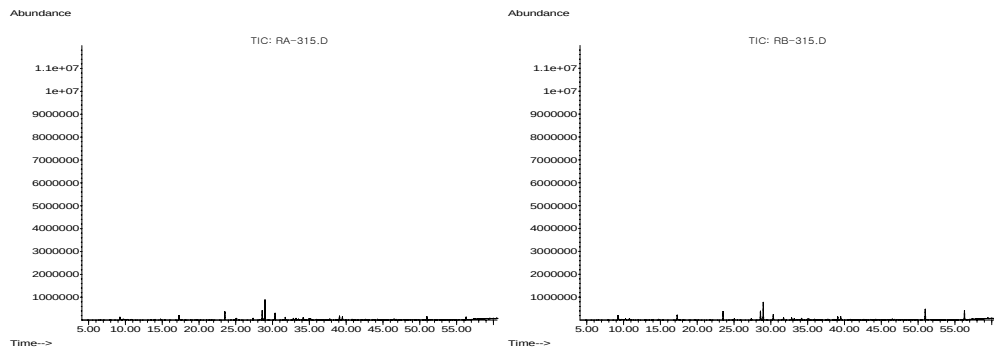


(그림 16) 난방실시 7일 후 A, B실의 HCHO 크로마토그램

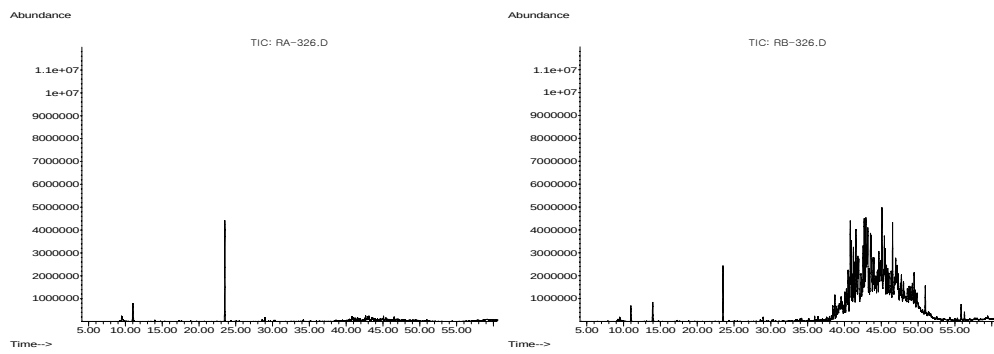


(그림 17) 난방실시 14일 후 A, B실의 HCHO 크로마토그램

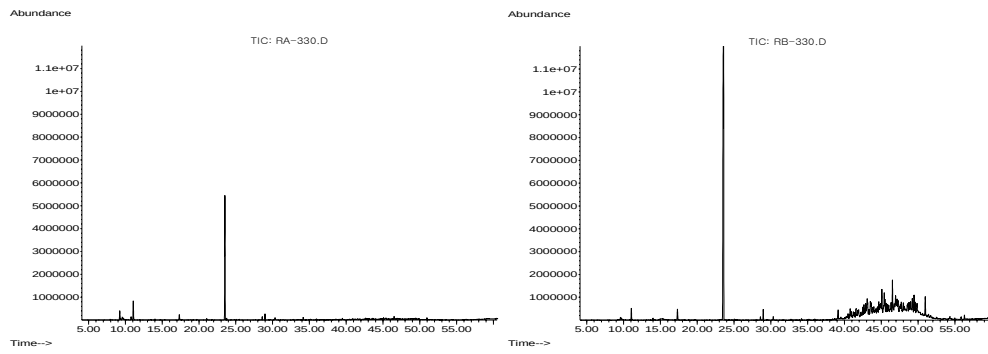
2.2 TVOC 크로마토그램



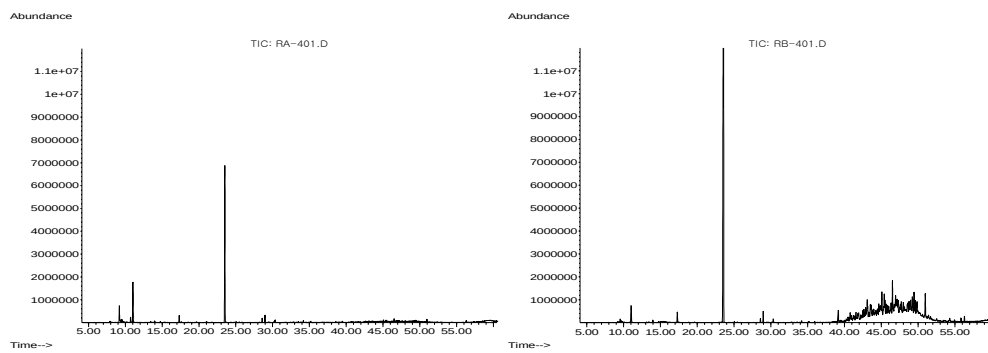
(그림 18) 벽체 및 바닥시공 후 A, B실의 TVOC 크로마토그램



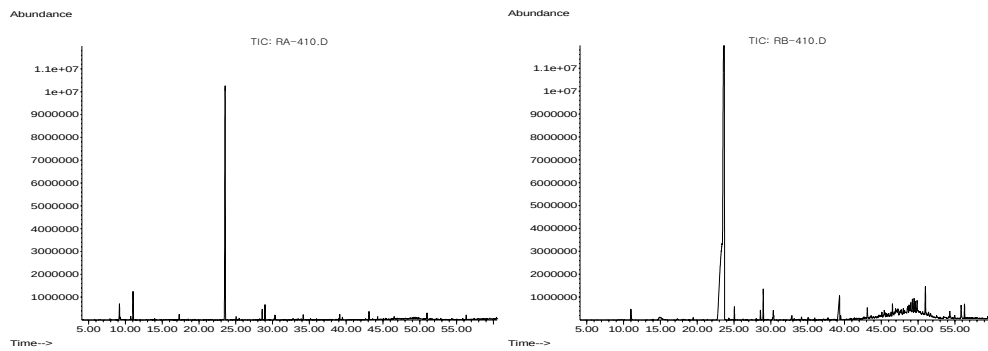
(그림 19) 도배시공 후 A, B실의 TVOC 크로마토그램



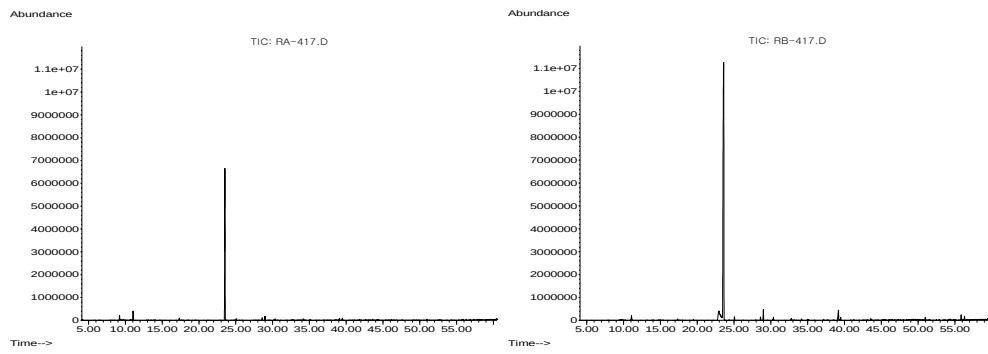
(그림 20) 바닥시공 1일 후 A, B실의 TVOC 크로마토그램



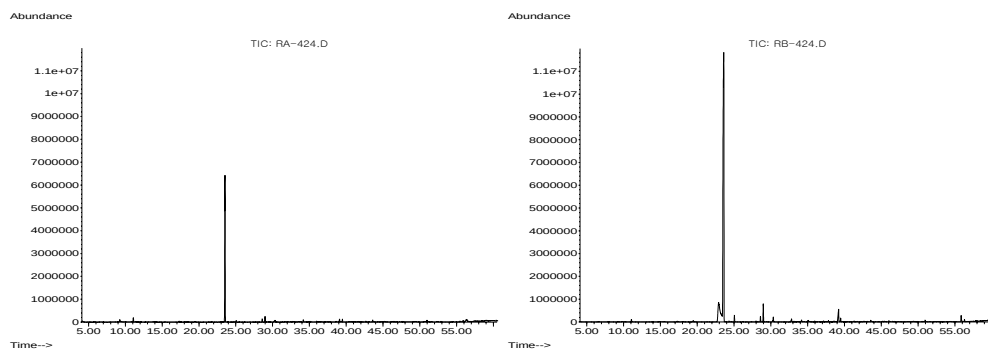
(그림 21) 바닥시공 3일 후 A, B실의 TVOC 크로마토그램



(그림 22) 난방실시 후 A, B실의 TVOC 크로마토그램



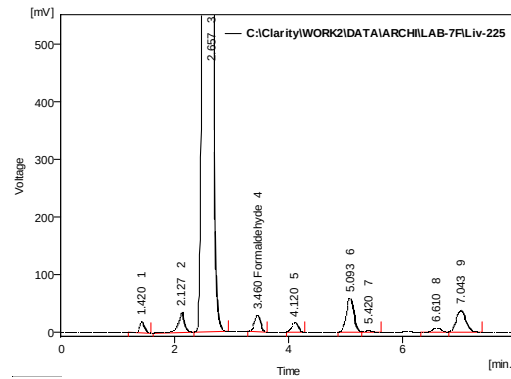
(그림 23) 난방실시 7일 후 A, B실의 TVOC 크로마토그램



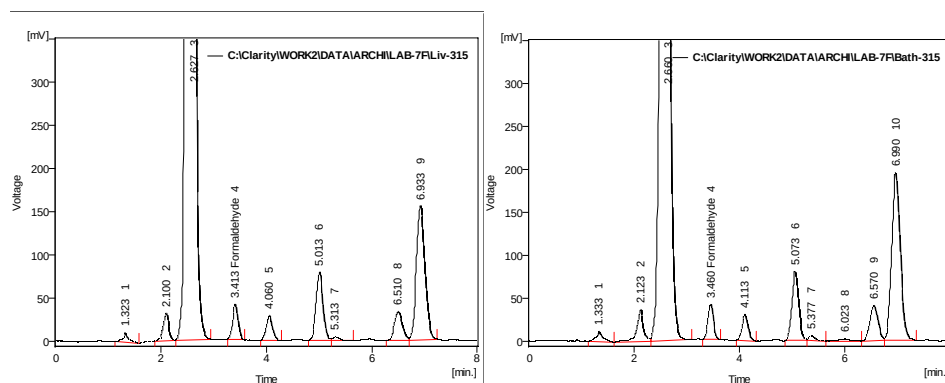
(그림 24) 난방실시 14일 후 A, B실의 TVOC 크로마토그램

3. 신축 오피스텔 시공단계별 크로마토그램

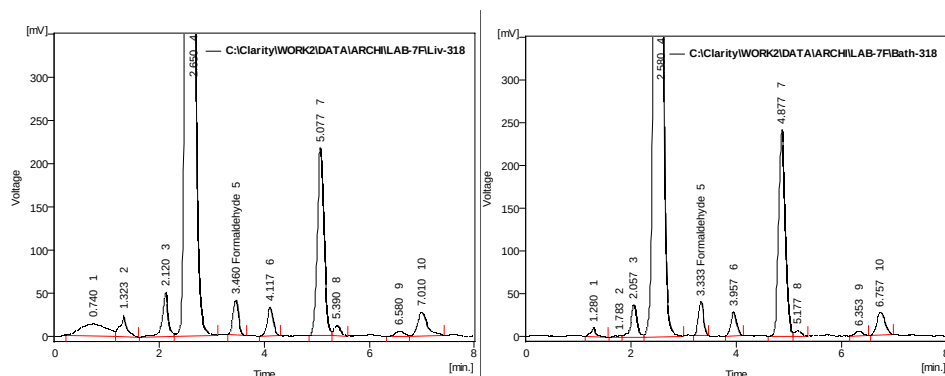
3.1 폼알데하이드 크로마토그램



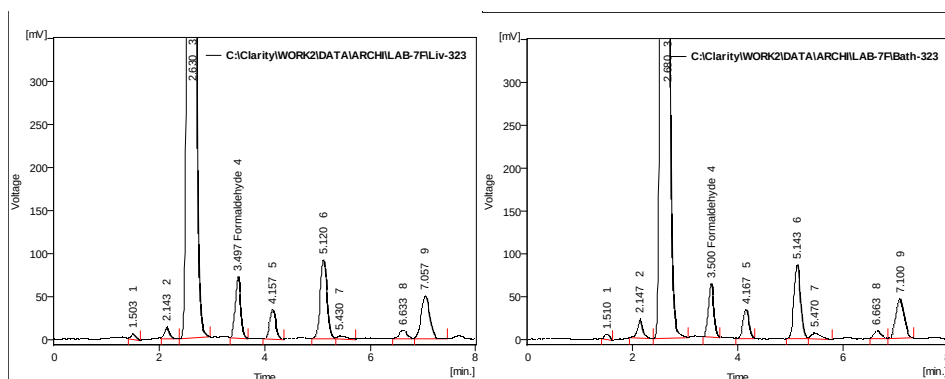
(그림 25) 기존 시설 철거 후의 HCHO 크로마토그램



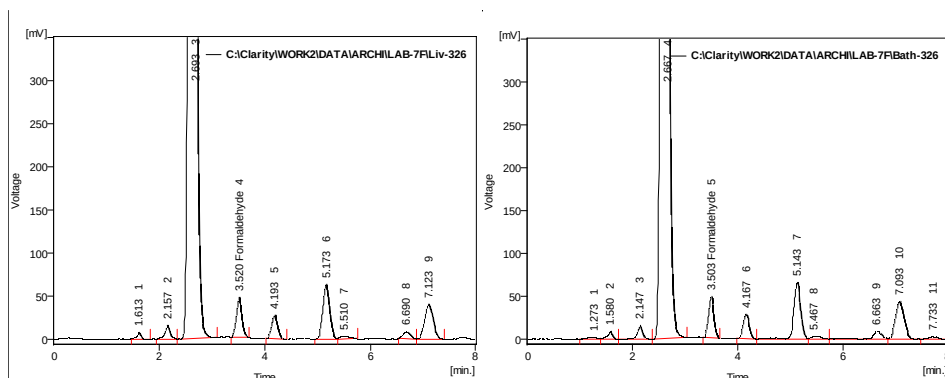
(그림 26) 콘크리트 양생 및 욕실 방수 후의 HCHO 크로마토그램



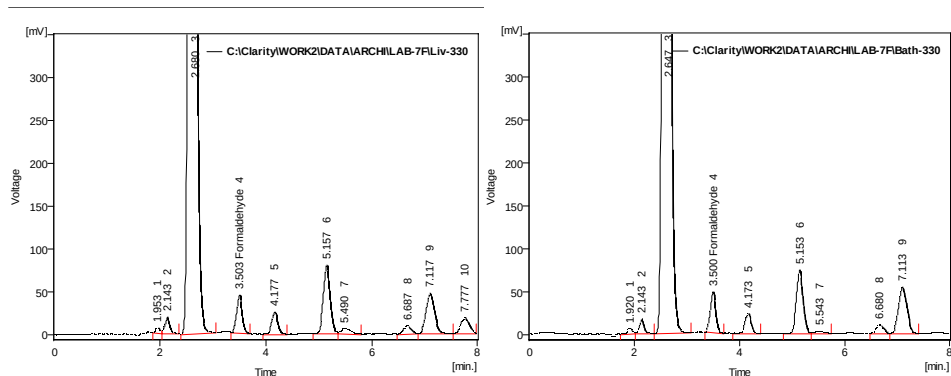
(그림 27) 주방 및 욕실 타일 시공 후의 HCHO 크로마토그램



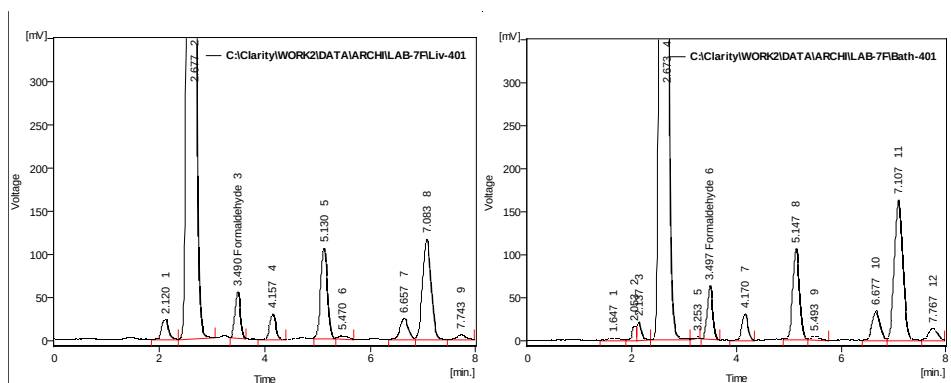
(그림 28) 초배 시공 후의 HCHO 크로마토그램



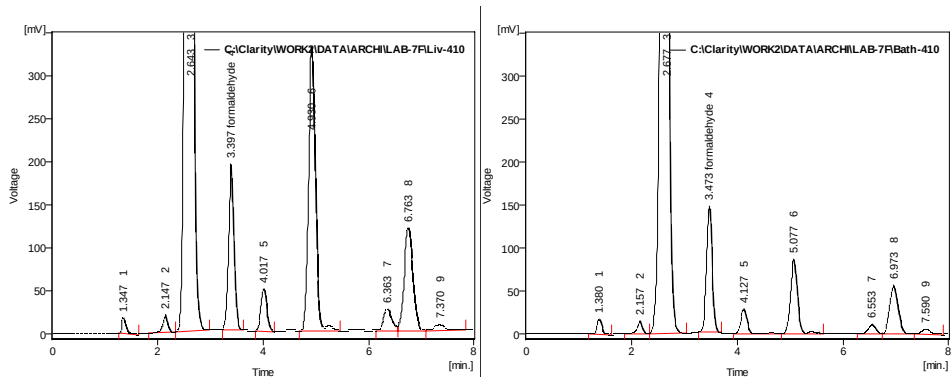
(그림 29) 정배 시공 후의 HCHO 크로마토그램



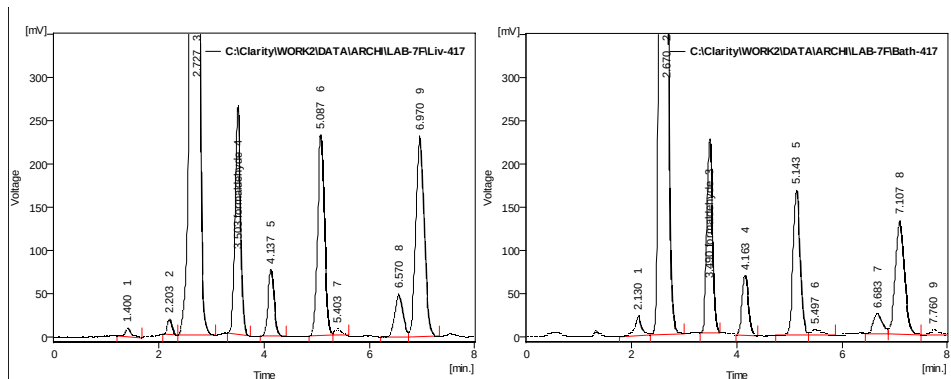
(그림 30) 온돌마루 시공 후의 HCHO 크로마토그램



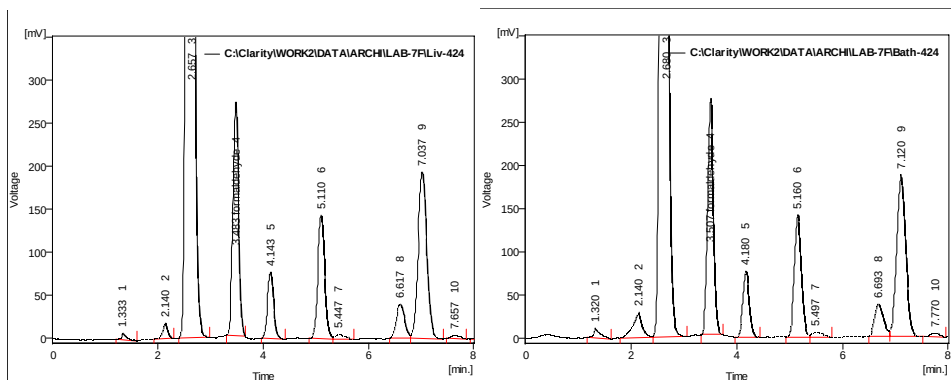
(그림 31) 온돌마루 양생 후의 HCHO 크로마토그램



(그림 32) 문 시공 후의 HCHO 크로마토그램

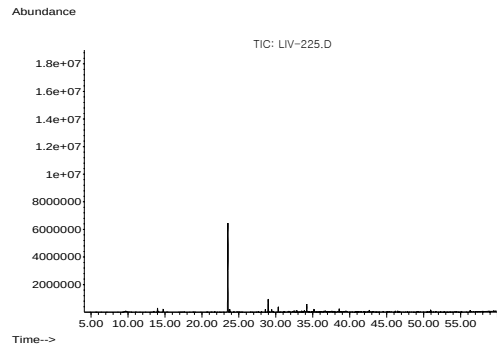


(그림 33) 가구 반입 후의 HCHO 크로마토그램

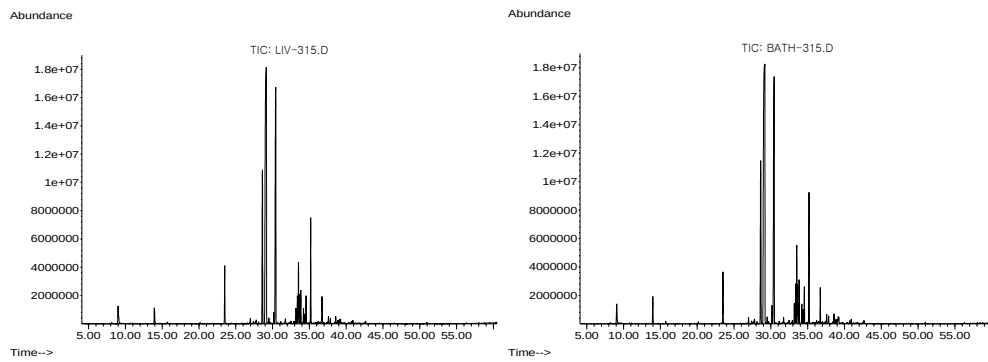


(그림 34) 시공 완료 후의 HCHO 크로마토그램

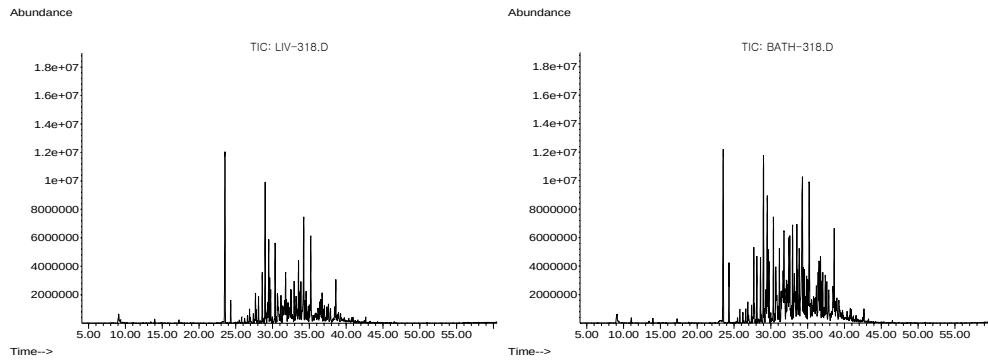
3.2 TVOC 크로마토그램



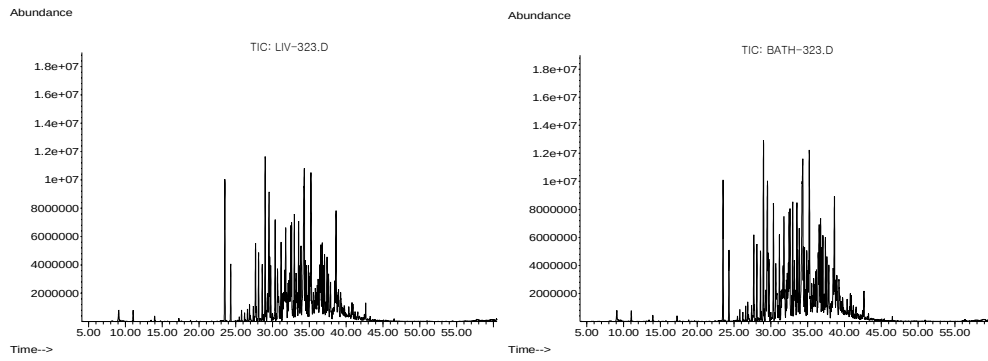
(그림 35) 기존 시설 철거 후의 TVOC 크로마토그램



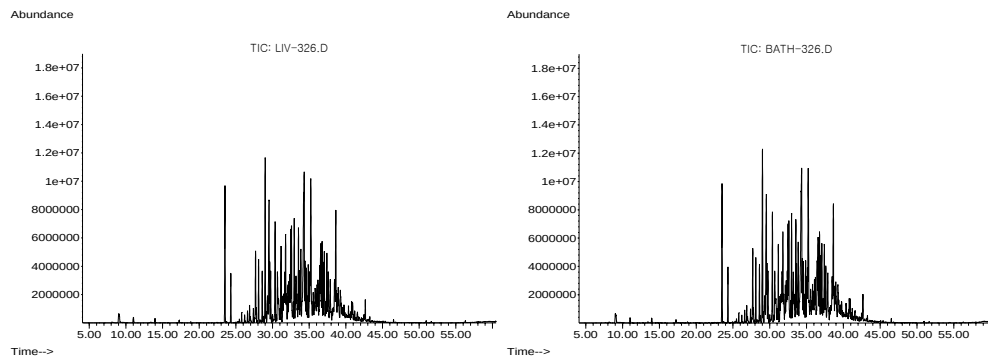
(그림 36) 콘크리트 양생 및 욕실 방수 후의 TVOC 크로마토그램



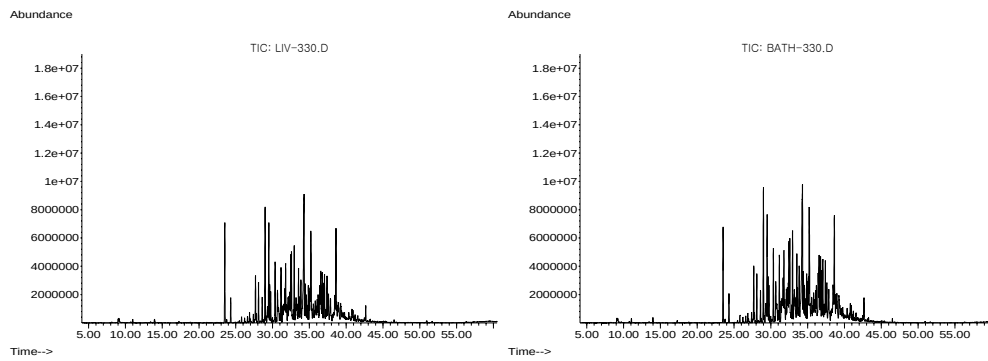
(그림 37) 주방 및 욕실 타일 시공 후의 TVOC 크로마토그램



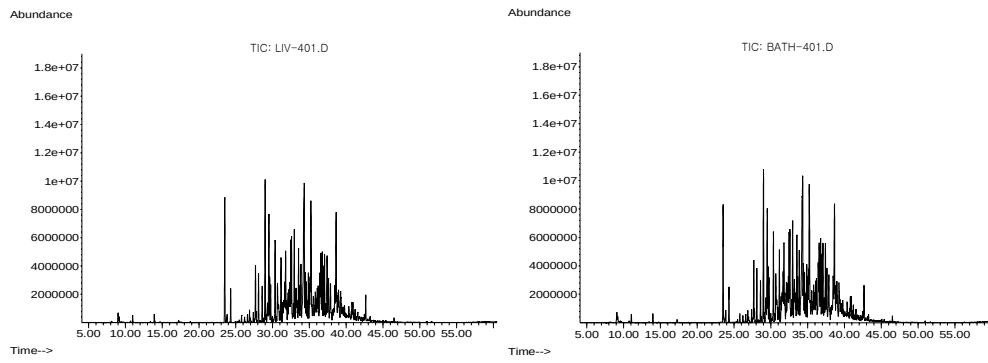
(그림 38) 초배 시공 후의 TVOC 크로마토그램



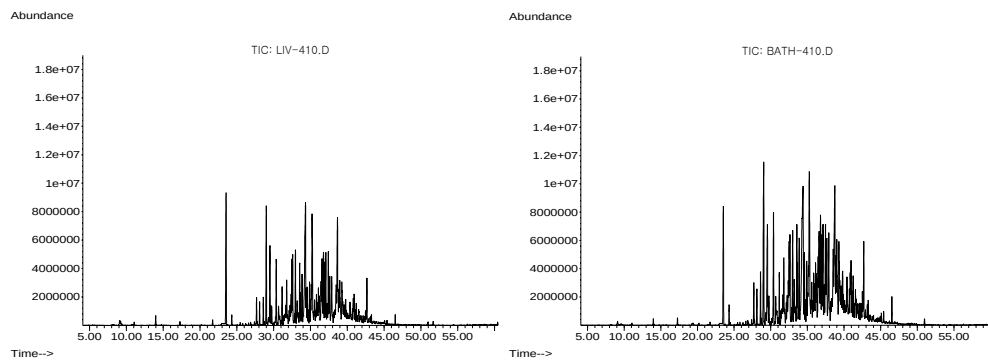
(그림 39) 정배 시공 후의 TVOC 크로마토그램



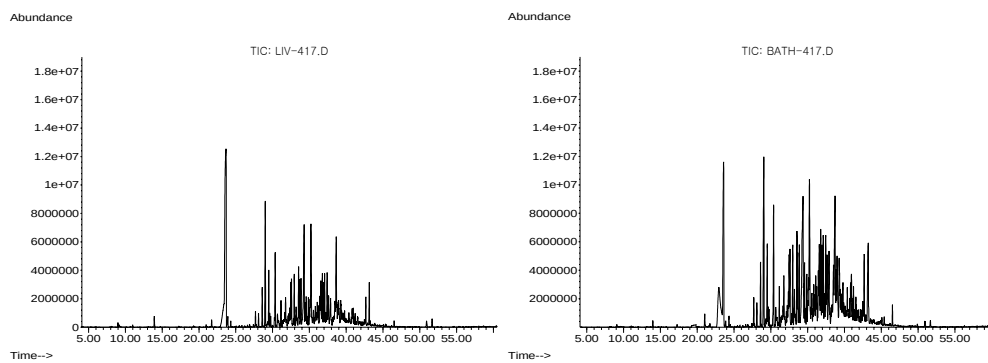
(그림 40) 온돌마루 시공 후의 TVOC 크로마토그램



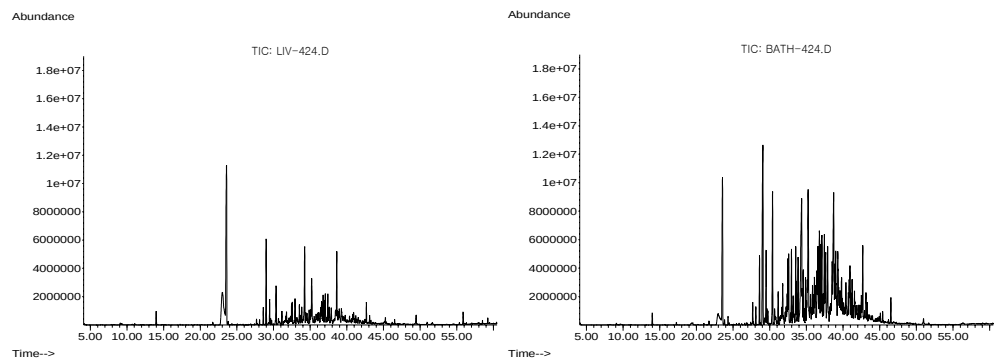
(그림 41) 온돌마루 양생 후의 TVOC 크로마토그램



(그림 42) 문 시공 후의 TVOC 크로마토그램



(그림 43) 가구 반입 후의 TVOC 크로마토그램



(그림 44) 시공 완료 후의 TVOC 크로마토그램

국 문 초 록

신축공동주택 실내공기오염물질의 발생원인 및 방출특성에 관한 실험 연구

- 폼알데하이드와 TVOC를 대상으로 -

유 형 규

건축학과 건축계획 및 환경전공

중앙대학교 대학원

지도교수 이 언 구

최근 신축공동주택에서의 실내공기질 문제가 심각하게 대두되어 건물병증후군(Sick Building Syndrome : SBS) 및 새집증후군(Sick House Syndrome : SHS)과 같은 국민건강을 위협하는 사회적 문제로 발전하고 있다. 신축공동주택에서의 실내공기질 문제는 건축자재에서 발생하는 폼알데하이드와 TVOC가 주된 원인으로 알려져 있다. 따라서, 대량으로 건설되는 공동주택의 특성상, 부적절한 건축자재의 선정과 공법으로 인한 피해는 일반 건물과 비교하여 매우 심각하게 나타난다.

이러한 공동주택의 실내공기질 문제를 조속히 해결하기 위해서는 일반시민, 민간단체, 학계, 산업계, 정부 등이 공동으로 참여하여 기술적, 제도적 측면에서 노력을 기울여야 한다. 특히, 학계는 건축, 보건, 화학 등 다양한 분야의 전문가가 서로 협동하여 문제의 원인과 해결방안을 모색하여야 한다. 이 중 가장 우선적으로 선행되어야 할 과제는 실내공기오염물질의 원인인 건축자재의 특성을 파악하는 것으로, 건축자재 분류체계를 설정하여 오염물질 데이터베이스를 마련하는 것이다. 이와 함께, 벽과 바닥과 같은 여러 건축자재들의 조합으로 이루어진 건축공간 구성부위의 오염물질 방출특성을 파악하고, 건축시공 전반에 걸쳐 시공과정 및 방법에 대한 검토가 필요하다.

본 연구는 공동주택에 사용되는 건축자재와 시공과정에서 발생하는 실내공기오염물질의 발생원인과 방출특성을 파악하여, 공동주택의 실내공기질과 관련한 데이터베이스 마련을 위한 기초 연구로서 연구 결과는 다음과 같다.

1) 건축자재 종류별 오염물질 방출 특성

국내에서 생산되는 건축자재의 폼알데하이드와 TVOC 방출 실태를 파악하기 위하여 건축자재 100종을 대상으로 종류별, 성분별로 분류하여 방출강도를 시험하였다.

시험 결과, 폼알데하이드 방출강도의 경우, 벽지는 실크벽지, 초배벽지, 종이벽지 순으로 낮게 나타났으며, 접착제는 목재용, 타일접착용, 벽지접착용, PVC 및 바닥판 접착용 순으로 낮게 나타났고, 바닥재는 온돌마루, 립바닥재 순으로 낮게 나타났다. 시험한 모든 건축자재에서 폼알데하이드 방출강도는 낮게 나타나 폼알데하이드에 대한 과소평가가 우려된다. 따라서 국내 건축자재의 특성과 인체 위해성을 함께 고려한 폼알데하이드의 등급 개선이 요구된다.

TVOC 방출강도의 경우, 벽지는 실크벽지, 종이벽지, 초배벽지 순으로 낮게 나타났으며, 접착제는 타일접착용, 목재용, PVC접착용, 바닥판접착용, 벽지접착용 순으로 낮게 나타났고, 바닥재는 립바닥재, 온돌마루 순으로 낮게 나타났다. 이 중 실크벽지는 다중이용시설등의실내공기질관리법에서 사용을 금지하고 있는 TVOC 방출강도 $4\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 이상인 제품이 26개 중 5건 나타났고, 접착제는 Acryl을 주성분으로 하는 타일접착용에서 TVOC 방출강도 $10\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 를 초과하는 제품이 4개 중 3건 나타났다. 또한, PIB를 주성분으로 목재접착용은 모든 제품이 TVOC 방출강도 $10\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 를 초과하는 것으로 나타났다.

2) 건축자재 마감구성에 따른 방출강도 특성

공동주택의 벽과 바닥과 같은 건축부위는 여러 건축자재의 조합으로 구성되기 때문에 이로 인하여 방출특성이 변화한다. 따라서 건축자재 방출강도 시험결과와 종류별 특징을 바탕으로 건축자재를 선정하고, 실제 시공방법과 동일하게 마감구성재를 제작하여 방출강도를 실험하였다.

실험 결과, 폼알데하이드 방출강도는 7일차를 기준으로 타일벽, 온돌마루, 종이벽지, 립바닥재, 실크벽지 순으로 방출강도가 낮게 나타났다. TVOC 방출강도는 20일차를 기준으로 타일벽, 립바닥재, 실크벽지, 온돌마루, 종이벽지 순으로 방출강도가 낮게 나타났으며, 건축자재 종류에 따라 뚜렷한 차이가 있었다. 또한, 건축자재의 마감구성재 내 위치에 상관없이 방출강도가 높은 건축자재에 따라 마감구성재의 방출강도가 결정되었으며, 단위 면적당 중량이 크고, 방출

강도가 높은 마감구성재는 시간경과에 따른 감소율도 작아 실내공기에 오랜 시간 동안 영향을 주는 것으로 나타났다.

3) 마감구성재 Mock-Up 비교 실험

마감구성재 오염물질 방출 실험은 엄격히 통제된 실험실 조건에서 수행한 것으로, 실제 공동주택에 시공되었을 때는 온도, 습도, 기류, 환기 등의 조건으로 인하여 차이가 나타날 수 있다. 따라서, 공동주택의 단위 공간인 침실과 거실 또는 기존 공동주택의 리모델링을 가정한 두 개의 Mock-Up 실험실에 TVOC 방출강도가 낮은 재료(A실)와 높은 재료(B실)를 적용하여 오염물질 방출량 차이를 비교하였다.

실험결과, 폼알데하이드 방출량은 시공 40일 경과 후, A실과 B실이 각각 $76.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $22.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 다중이용시설등의실내공기질관리법 기준인 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였다. TVOC 방출량은 시공 40일 경과 후, A실은 $528.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 기준 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 근접하게 나타났으나, B실은 $2004.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 기준 4배가 넘는 것으로 나타났으며, 6종 VOCs 방출량 또한 바닥재 설치 이후 Toluene이 $593.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 급격히 증가하여 홍콩과 일본 등의 가이드라인 기준을 만족하지 못하였다. 따라서, 공동주택의 실내공기질 개선은 비용을 추가하거나 특별한 기술을 적용하기 전에 오염물질 저방출 건축자재 사용이 우선 선행되어야 함을 확인하였다.

4) 원룸 아파트 시공 전과정에 따른 오염물질 방출량 분석

실제 공동주택은 다양한 건축자재들이 복합적으로 사용되고 있으므로 일부 건축자재만 적용한 Mock-Up 실험만으로는 정확한 실내공기오염물질의 발생원인을 파악하기 어렵다. 따라서, 실물 원룸 아파트를 건설하여 공동주택 시공 전과정에서의 실내공기오염물질 방출량 변화를 분석함으로써, 실내공기오염물질이 발생하는 기타 건축자재 및 시공단계를 파악하였다.

실험 결과, 시공 초기의 폼알데하이드 방출량은 대체로 낮게 거실과 욕실이 비슷한 방출량과 패턴으로 나타났다. 그러나 문 시공과 난방 실시 후 $135.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 급격하게 상승하여 국내 기준 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였으며, 가구를 반입하고 공사가 완료된 후 $200.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 크게 증가하였다. 따라서 실내 폼알데하이드 증

가는 목재를 원료로 한 문과 가구 시공단계가 주요 원인으로 나타났다.

TVOC 방출량은 기존시설의 철거 후부터 $799.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 국내 기준 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하지 못하였으며, 거실 주방과 욕실 타일 시공한 후 타일접착제에서 방출되는 오염물질로 인하여 거실과 욕실이 각각 $10087.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $21683.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 급격하게 증가하였다. 공사가 최종 완료된 후에도 거실은 $8878.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 국내 기준을 크게 초과하였으며, 욕실은 $24590.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 거실의 약 2.8배가 되었다. 크로마토그램 분석 결과, 실내 TVOC 증가의 주요 원인은 타일접착제로 나타났다. 또한, 문 시공과 가구반입 후 Toluene이 크게 증가하여, 가구는 폼알데하이드 뿐만 아니라 VOCs 증가에도 큰 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 6종 VOCs 중 가장 많이 검출된 것은 Toluene으로 공사가 최종 완료된 후 거실 $471.0\mu\text{g}/\text{m}^3$, 욕실 $383.\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 홍콩과 일본의 가이드라인을 크게 초과하였다.

이상 공동주택에 사용되는 건축자재와 시공과정 중에서 다량의 실내공기오염 물질이 발생하는 원인을 실험을 통하여 밝혀내었으며, 향후 본 연구결과를 고려하여 건축설계와 시공이 이루어진다면 공동주택의 건강한 실내공기질을 유지하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

ABSTRACT

An Experimental Study on the Major Causes and Emission Characteristics of Indoor Air Pollutants in Newly-Constructed Multi-Family Houses - with emphasis on HCHO and TVOC -

Hyung-Kyu Yu

Department of Architecture

The Graduate School of Chung-Ang University

Advised by Prof. Eon Ku Rhee, Ph.D.

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.

Therefore, to solve Multi-Family Houses' IAQ problem, people, private organization, academic circles, industry, government etc. must work closely together. Specially, various field of academic circles in areas such as construction, health, chemistry cooperates one another to search the cause and solution of IAQ problem.

The first thing to do is establishing building materials classification system and constructing indoor air pollutant database. It is also essential to understand indoor air pollutant emission characteristics of building parts such as wall and the floor which are made of several building materials assembly, and to examine the whole construction process and method.

This research aims to identify major causes and emission characteristics of Indoor Air Pollutants in Multi-Family Houses. The findings of the research are summarized as follows.

(1) Emission characteristics of Building materials.

100 building materials produced in Korea are tested to understand formaldehyde and TVOC emission characteristics. These materials are classified by their ingredients and usage.

As a result, formaldehyde emission intensity's case, wallpaper appeared low in an order of Silk Wallpaper, Underpaper, Wallpaper, and adhesives appeared low in an order of Wood Bond, Tile Bond, Wallpaper Bond, PVC and Flooring Bond, and flooring appeared low in an order of Wood Flooring, Reum Flooring. Because formaldehyde emission intensity appeared low in all building materials that tested, underestimation about formaldehyde is worried. Therefore, improvement of formaldehyde grade that consider characteristics of Korean building materials and harmfulness to human body hazards is required.

In the case of TVOC emission intensity, wallpaper appeared low in an order of Silk Wallpaper, Wallpaper, Underpaper, and adhesives appeared low in an order of Tile Bond, Wood Bond, PVC Bond, Flooring Bond, Wallpaper Bond, and flooring appeared low in an order of Reum Flooring, Wood Flooring. Silk Wallpaper appear over TVOC emission intensity $4\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 5 among 26 that is prohibiting use in Korea Internal Standard, and adhesives appear exceeds TVOC emission intensity $10\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 3 among 4 in Tile Bond that contain Acryl by main ingredients. Also, PIB by main ingredients all Wood Bond product TVOC emission intensity $10\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ exceed.

(2) Emission characteristics of composed building materials.

Building parts of Multi-Family Houses are consisted of several building material assembly. Therefore, after selecting building materials with test result of emission intensity and their feature, composed building materials are made equally with actual construction methods, and experimented emission

intensity.

7 days after experiment, formaldehyde emission intensity appeared low in an order of Tile Wall, Wood Flooring, Wallpaper, Reum Flooring, Silk Wallpaper, and 20 days after experiment, TVOC emission intensity appeared low in an order of Tile Wall, Reum Flooring, Silk Wallpaper, Wood Flooring, Wallpaper. There was a clear difference in TVOC emission intensity according to kind of building materials. Also, regardless of building materials location, emission intensity of composed building materials was decided according to building materials that emission intensity is high. Composed building materials that weight per unit area is big and emission intensity is high, they effect continuously to indoor air because decrement is small.

(3) Mock-Up comparison experiment of composed building materials.

Because emission intensity of composed building materials experiment was achieved under laboratory condition controled strictly, in actual Multi-Family Houses difference can be showed by condition of temperature, humidity, air current, ventilation etc.. Therefore, 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 applied to B Room, and are compared difference.

As a result, formaldehyde emission amount 40 days after construction, A Room($76.0\mu\text{g}/\text{m}^3$) and B Room($22.1\mu\text{g}/\text{m}^3$) each satisfied Korea Internal Standard standard $120\mu\text{g}/\text{m}^3$. TVOC emission amount 40 days after construction, A Room($528.4\mu\text{g}/\text{m}^3$) approximately reached to Korea Internal Standard $500\mu\text{g}/\text{m}^3$. But, B Room($2004.6\mu\text{g}/\text{m}^3$) exceeded 4 times of Korea Internal Standard, and 6 types VOCs emission amount did not satisfy Hong Kong and Japan guideline of Toluene, since flooring construction were increased $593.5\mu\text{g}/\text{m}^3$. Therefore, first consideration of IAQ improvement of Multi-Family Houses is using low pollutant emission building materials before adding expense or applying high technology.

(4) Analysis of indoor air pollutant emission amount by whole construction process of small house.

Since actual Multi-Family Houses are using various building materials, a Mock-Up experiment that applies part of building materials is not sufficient to know precise occurrence cause of indoor air pollutants. Therefore, in this study we built small house and analyzed change of indoor air pollutant emission amount in construction process.

As a result, formaldehyde emission amount of early construction stage were appeared low level, and living room and bath room were appeared by similar emission amount and pattern. But, it rises sharply by $135.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ after door construction and floor heating, by exceeding Korea Internal Standard $120\mu\text{g}/\text{m}^3$. Also, after construction is completed, it increased greatly by $200.7\mu\text{g}/\text{m}^3$. Therefore, door and furniture construction(Main raw material is wood) is a major cause of indoor formaldehyde increase.

TVOC emission amount did not satisfy Korea Internal Standard $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ by $799.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ at existing facilities removal. Also, after the kitchen and bath construction, because of indoor air pollutant emitted in Tile Bond, living room and bath room increased sharply by each $10087.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ and $21683.3\mu\text{g}/\text{m}^3$. Finally after construction work is completed, living room exceeded greatly Korea Internal Standard by $8878.5\mu\text{g}/\text{m}^3$, and baths became about 2.8 times of living room by $24590.6\mu\text{g}/\text{m}^3$. As chromatogram analysis result, major cause of room TVOC increases appeared by Tile Bond. Also, Toluene increases greatly after door and furniture, wood appeared that is exerting big effect greatly to VOCs increase as well as formaldehyde. Among 6 VOCs detected the most is Toluene, and after construction is completed it exceeded greatly guideline of Hong Kong and Japan by living room $471.0\mu\text{g}/\text{m}^3$, bath $383\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Through experiment, major causes of indoor air pollutant among building materials and construction process used to Multi-Family Houses were found. If this finding is considered in architectural design and construction work, it is expected to contribute greatly keeping healthy IAQ of Multi-Family Houses.

드디어 모든 미련을 과감히 떨쳐버리고 논문에서 손을 떼었다. 이제 며칠 후면 평생 나를 졸졸 쫓아다닐 논문이 한편의 책으로 만들어져 내 손에 쥐어지겠지? 한편으로는 후련하고 또 아쉽다. 지금이라도 다시 볼까? 모든 미련을 과감히 떨쳐버렸다고 하고선 망설여진다. 시작이 쉽지 않았던 만큼 끝을 보기도 쉽지 않다.

돌이켜보면 연구실이라는 이 작은 공간에서 많은 일을 겪으면서 지내왔다. 많은 사람과 인연을 만들고 그 인연들과 아옹다옹 부딪히면서 지내온 세월이 더 큰 성과물이 아닐까? 머리 속을 스쳐지나가는 많은 분들, 굳이 글로서 그 마음을 표현하려는 지금이 그 어느 때보다 힘이 든다. 이것이 끝이 아닐 텐데 이 짧은 글도 그 마음을 표현하는 것이 실례가 되지 않을까.....

이제는 박사학위과정을 마무리하는 글이자, 청년학자로서 새로 시작하는 첫 번째 글을 Tm고자 한다. 좀 더 편한 마음으로 근사하고 멋진 감사의 글을 쓰고 싶었는데, 결국은 상투적이고 보잘 것 없는 글이 되어버렸다.

감사의 글

이언구 교수님!

저를 믿어 주심에 감사합니다. 저를 바라보시는 불안한 마음 깊숙이 감추시고, 끝까지 믿고 지켜보아 주신 것이 저에겐 그 어떤 칭찬보다도 큰 힘이 되었습니다. 감히 그 모습 따라 배우고 실천하도록 하겠습니다.

논문 심사위원장이신 이명호 교수님! 저의 작은 변화에도 관심을 가져 주셨던 교수님의 제자 사랑을 깊이 느꼈습니다. 저의 학부 지도교수님이셨던 조균형 교수님! 교수님께 대한 죄송한 마음 다 갚지 못했습니다. 갚을 수 있는 기회를 차근차근 만들어 가겠습니다. 박진철 교수님! 선배님이라는 편안함과 교수님이라는 격식 사이를 위태롭게 줄타기 했습니다. 김신도 교수님! 심사위원님은 지도교수와 같다는 이언구 교수님의 말씀 따라 자주 뵙고 많은 조언을 얻도록 하겠습니다.

논문과 연구실 일을 하면서 만난 많은 분들 감사합니다. 서인택 선생님을 비롯한 기초과학센터 선생님들, 서태일 부장님을 비롯한 SK건설 여러분, 김정현 전무님을 비롯한 대성기연 여러분, 그리고 연구실의 많은 선후배님들! 여러분의 이름

을 하나 하나 되새기지 못함을 죄송하게 생각합니다.

한 집안의 믿음직스러운 가장이 된 나의 동생 형주, 우리 집의 고명딸이 되어준 제수씨 주연, 세상에서 가장 예쁜 꼬마 채린, 그리고 미국에서 많은 힘이 되어준 줄리..... 사랑합니다. 그리고 감사합니다.

마지막으로, 장남 구실 못하는 큰 아들을 끝까지 믿고 지켜보아 주신 아버님 어머님! 감사합니다. 제가 지금의 부모님의 나이가 될 때까지 오래 오래 사세요. 이 큰 아들이 호강시켜드리겠습니다.

지금 내딛는 한걸음을 모든 것의 시작이라 생각하고, 새로운 첫 발걸음을 내딛겠습니다. 이제는 설렘과 두려움보다는 자신감과 호기심이 앞섭니다. 자만함으로 변하지 않도록 모두들 지켜봐 주십시오.

감사합니다.