

## 실내 공기환경에서 휘발성 유기화합물질(VOCs)의 특성과 제어방법

### Characteristics and Control of Volatile Organic Compounds in Indoor Air Environment

손 장 열

J. Y. Sohn

한양대학교 건축공학부 교수



· 1945년생

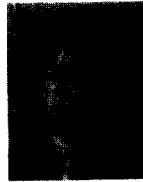
· 온열환경, I.A.Q

클린룸에 관심을 가지고 있다.

윤 동 원

D. W. Yoon

대전산업대학교 건축공학과 조교수



· 1958년생

· IAQ, 온열환경

등에 관심을 가지고 있다.

#### 1. 머릿말

최근 건축공사에는 많은 종류의 건축자재와 내장재료가 사용되고 있으며, 특히 화학기술의 발달과 더불어 복합화합물로 구성된 건축재료들의 사용이 증가하고 있다. 복합재료중에는 다량의 휘발성 유기화합물질(VOCs: Volatile Organic Compounds)을 실내공기로 방출하고 있어 실내 환경오염의 주요 요인이 되고 있다. 그러나 이로부터 야기되는 실내공기오염에 대하여서는 전혀 고려되지 않은채 건축자재의 선정과 시공이 이루어지고 있다. 한편, 현대인은 하루중 거의 90%이상을 실내의 인공환경에서 생활하고 있으며, 에너지절약을 위하여 건물은 점차로 단열화, 기밀화되고, 외기도입을 최소한으로 감소시킴으로써 실내에서는 적절한 환기량을 확보하지 못하는 경우가 발생하고 있다. 오염물질은 실내의 공기환경(IAQ: Indoor Air Quality)을 악화시키며, 한정된 실내공간에서 오랜시간 생활하는 재실자의 건강에 영향을 미치게 된다.

대부분의 VOCs 물질은 건축재료로부터 오랜시간 동안에 서서히 실내공기로 방출하게 되며, 농도가 낮고 그 종류도 매우 다양하기

때문에 검출이 쉽지 않은 것이 특징이다. 미국 환경청(U.S. EPA: Environmental Protection Agency)의 조사자료에 의하면 학교 건물에서 약 160가지 정도의 VOCs 물질이 검출되었고, 공공건물에서 500여 종류가 검출되었다. VOCs 물질이 인체의 건강에 미치는 영향은 아직까지도 명확하게 밝혀지진 않았지만 대부분의 물질이 재실자에게 자극과 불쾌감을 유발하며, 여러 종류의 발암성 물질을 포함하고 있는 것으로 알려지고 있다. 실내에서 방출되는 VOCs 물질 중에서 80%정도가 인체의 호흡기관을 자극하고 눈의 통증이나 자극을 유발하며, 이 중에서 25%정도는 발암성 물질로 파악되고 있다. 이러한 물질이 비록 낮은 농도로 실내에 존재할지라도 이러한 물질에 오염된 공기환경에서 대부분의 시간을 생활하는 재실자에게 실내 환경에 대한 불만족 요소로 작용할 뿐만아니라 건강에도 직접적으로 나쁜 영향을 미치게 된다. VOCs 물질은 실내 공기환경을 악화시키는 직접적인 요인이 되며, 특히 현대식 건물증후군(SBS: Sick Building Syndrome)의 직접적인 원인으로 밝혀지고 있다.

실내공기에서 VOCs 물질의 농도는 외부공

기(대기)보다 2-10배정도 높게 나타나며, 특히 신축건물에서는 최고 100배까지 높은 농도로 나타나고 있다. 실내의 농도는 그 발생원의 종류와 발생강도에 의하여 결정되며, 건물의 용도, 환기성능, 건물의 경과년도(준공연도)등에 의하여 농도의 분포가 다르게 나타난다. 실내 공기환경에서 이러한 물질의 발생을 억제하고 제어하기 위해서는 건축자재에 대한 실험결과로부터 VOCs 물질의 방출강도와 방출량을 참조하여 적절한 건축자재의 선정과 시공방법을 검토하여야 한다. 그러나 합판이나 카펫트 등 대표적인 제품을 제외하면 건축자재에서 방출되는 물질에 대한 종류와 특성은 아직도 보편화되지 않은 상태이며, 현재에도 이러한 특성을 파악하려는 연구가 계속되고 있다. 또한, 실내의 VOCs 물질의 발생원으로부터 방출량을 제어하고, 실내의 오염농도를 감소시키기 위한 여러가지 방법이 시도되고 있다. 현재 미국에서는 신축건물이나 보수공사가 실시된 건물에 대하여 건물의 사용전에 실내온도를 고온으로 가열하는 베이아웃(bakeout)방법이 채택되고 있다. 이것은 마감재료를 포함한 건축자재와 가구류, 각종 실런트 등에서 방출되는 휘발성 유기화학물질들을 강제로 일시에 많은 량을 방출시키도록 유도하는 방법이다.

VOCs 물질은 재실자에게 불쾌한 냄새나 호흡기의 자극 뿐만 아니라 피로감, 메스꺼움, 또는 집중력 감퇴 등을 유발한다. 일부 VOCs에는 발암성물질과 재발성 질병의 원인물질이 포함되어 있어 이러한 물질에 대한 대책이 마련되어야 한다. 실내 공기환경에 대한 VOCs 물질의 종류 및 특성을 알아보고, 이에 대한 VOCs 물질의 종류와 특성을 파악하고, 실내 환경에 미치는 영향과 제거방법들에 대하여 면밀히 검토할 필요가 있다. 본 고에서는 실내공간에서 공기 중으로 방출되는 측정기술과 제어방법을 중심으로 기술한다.

## 2. 실내의 VOCs물질의 종류 및 특성

최근 건축재료나 산업제품, 가구류 등에서 수많은 종류의 오염물질이 실내의 공기로 방출되어 공기환경을 악화시키고 있으며, 이러한 물질은 대부분 휘발성 유기화학 물질(VOCs)과 반휘발성 유기화학물질(SVOCs: Semi-Volatile Organic Compounds)인 것으로 밝혀지고 있다. 이들은 공기중의 분압이  $10^5-10^6$  [mmHg] 정도의 아주 낮은 농도로 존재하기 때문에 검출이 쉽지 않은 것이 특징이다. 지난 십여년간 선진국을 중심으로 건축자재에서 방출되는 유기화학물질의 량을 감소시키려는 노력이 계속되고 있으나 아직까지도 상당량의 물질이 방출되고 있는 실정이다.

### (1) VOCs 물질의 발생원

실내 공기오염에 영향을 주는 VOCs 물질은 매우 다양하며, 주요 발생원은 건축자재와 마감재료, 건물의 유지관리용품(청소용, 각종 세척제 등), 소모성 재료(복사기의 토너), 연소과정의 물질, 재질자(인체), 외부공기 등으로 구분할 수 있다. 미국 환경청(U.S. EPA)에서 50여종의 건축재료를 선정하여 조사한 결과에 의하면 합판류, 목재의 접착제, 코킹재료, 페인트, 비닐이나 고무형 물딩 등에서 다량의 VOCs 물질이 방출되는 것으로 나타났다. VOCs 물질의 실내농도는 외부공기보다도 최고 100배 이상 높은 것으로 나타났으며, 주로 벤젠, 톨루엔, 크로로포름, 아세톤, 스틸렌, 에틸렌옥사이드 등의 물질이 검출되고 있다. 이들 물질에 대한 실내환경 문제는 건물의 준공후 6개월 이내의 시기에서 대부분이 발생되는 것으로 조사되었으며, 실내공기와 외부공기에 대한 VOCs물질 농도의 비율은 평균적으로 3:1 정도로 나타났다. 또한 인체도 일종의 VOCs 물질의 발생원이며, 생리작용이나 흡연에 의하여 이러한 물질을 방출하고 있다. 카펫트와 카펫트용 접착제도 주요 발생원으로 조사되었고, 공기조화설비에서 냉매가스나 네오프렌 덕트를 사용하는 경우에도 방출되는 것으로 나타났다. <표 1>은 건물의 실내에서

발생되는 주요 VOCs 물질과 그 발생원을 나타낸 것이다.

① 건축재료

건축구조재나 마감재 등의 건축재료에서 방출되는 VOCs 물질은 주로 건물중후군의 원인이 되는 각종 오염물질을 포함하고 있다. 신축건물이나 보수공사에 새로 사용된 재료에서 다량의 VOCs 물질이 방출되며, 특히 합성 화학 제품과 직물류로 구성된 건축자재에서 많은 양이 방출되고 있다. 또한, 직접 오염물질을 방출하지는 않지만 실내공기에 존재 VOCs 물질을 흡수하였다가 이것을 2차로

표 1 주요 VOCs 물질과 발생원

VOCs 물질	주요 발생원
벤젠(Benzen)	연기, 세척 및 청소용품, 페인트 제거제, 접착제, 파티클보오드
디클로로벤젠	방향제, 증약
펜타클로로벤젠	목재보존제, 곰팡이제거제, 제충제
부틸아세테이트	락커
톨루엔, 크셀렌	페인트, 접바닥용왁스, 니스, 염료착제, 등유용 난방기구, 벽지, 코킹 및 실런트 제품
스틸렌	담배연기, 코킹제, 발포형 단열재, 섬유형보오드

서서히 실내공기로 방출하는 경우도 있다. 대부분의 건축자재에서는 시공후 초기단계에 다량의 오염물질을 방출하게 되며, 시간의 경과에 따라 방출량이 점차로 감소된다. 접착제나 코킹재료는 시공이 끝난 후에 몇일이 경과되면 방출량이 반감되며, 합판재료나 파티클보오드와 같은 재료는 몇달 또는 몇년이 경과되어야만 그 방출량이 절반 수준으로 감소된다. 표 2는 VOCs 물질을 함유한 건축재료를 공사항목으로 구분하여 표시한 것이며, 표 3은 접착재료와 건축재료에서 방출되는 VOCs 물질의 종류를 나타낸 것이다.

② 건물의 유지관리 및 청소용 세제

건물을 청결하게 유지하는 과정에서 청소, 방충, 냄새제거, 운내기 작업, 보수작업 등에 사용되는 화학제품들이 VOCs 물질을 방출하며, 도색작업에 사용되는 페인트, 요해제 등의 각종용품들도 공기중으로 오염물질을 방출한다. 이러한 용품 중에는 제품에 따라 차이는 있지만 알코올이나 유기산 등의 산화처리제, 알카리성 약품, 방향제, 할로겐족 제품 등이 포함되어 있다. 건물의 유지관리 과정에서 방출되는 오염원의 종류와 방출강도, 방출량 등은 아직까지 정확하게 정량적으로 파악되지

표 2 건축공사의 세부 항목별 VOCs 물질을 함유한 재료

공사항목	VOCs 물질 포함재료
부지정리 및 기초	제충제 방수제
구조체 및 외부마감	목재보존제 코킹제 실런트 유리창틀, 퍼티 가스켓
단열공사	단열재 내화피복재 음향재료
공기조화설비	덕트보온재 덕트실런트 냉가수침가제 냉매
내장공사 및 마감재료	마감구조 바닥재료 카펫트접착제 카펫트, 비닐계 바닥재, 텍스타일 합판류 (파티클보오드, 침보오드, 하드보오드 등)
간막이벽	마감벽지나 직물류 접착제 페인트, 목재보존재 판넬류, 합판류
천장재	실링타일 판넬

않고 있다.

③ 연소과정에서의 방출

실내에서 연소기구를 사용하는 경우나 담배의 흡연도 실내 공기환경 오염의 주된 요인이 된다. 가스나 등유를 사용하는 연소기구, 난로와 같은 개별난방기구에 연통이나 배기구가 설치되어 있지 않은 경우에 연소가스와 함께 각종 오염물질을 직접 실내로 방출하게 된다. 가스기구의 연소과정에서는 다량의 포름알데히드가 방출되며, 흡연과정에서도 많은 VOCs와 SVOCs물질이 방출된다. 특히, 실내에서 흡연이 허용되는 건물의 경우에 흡연에 의한 오염물질들이 실내 공기로 방출되므로 이를 제거하기 위하여서는 환기량을 큰 폭으로 증

가시켜야 한다. 따라서 가능하면 실내에서의 흡연을 억제하는 것이 바람직하며, 그렇지 않은 경우에 부분적으로 흡연구역과 금연구역을 설정하고 흡연구역에 대한 특별 환기계획을 마련하여야 한다. 그 외에도 복사기의 사용과 사진의 인화작업 등에서도 VOCs물질이 방출된다.

④ 재실자

인체도 일종의 VOCs물질의 발생원으로 취급할 수 있다. 역사적으로 환기의 기준을 작성할때 인체의 체취를 환기량 설정의 기본척도로 활용하였으며, 현재에도 이를 실내환경의 종합평가 지표로 활용하려는 연구들이 시도되고 있다(덴마크의 P.O. Fanger 등) 인체로부터 방출되는 VOCs물질은 알코올 성분, 알데히드, 케톤, 톨루엔, 페놀 등 12종류 이상이 포함되어 있으며, 그 중에서 메탄(74mg/인.일)과 아세톤(51mg/인.일)이 가장 많이 방출되고 있다. 또한 화장품, 향수 등의 사용도 VOCs물질의 발생원인으로 작용하고 있다.

표 3 각종 접착재와 건축료에 함유된 VOCs 물질

건축재료	VOCs물질
라텍스코킹재	메틸에틸케톤, 부틸프로필레이트, 부탄올, 2-부톡시에탄올, 벤젠, 톨루엔
바닥접착재	디케인(decane), 언디케인(undecane), 논안(nonane), 디메틸옥탄, 2-메틸논안, 디메틸벤젠
파티클보오드	포름알데히드, 아세톤, 헥산을, 프로판올, 부탄올, 벤젠, 벤젠하이드
바닥광택제	논안, 디케인, 언디케인, 메틸옥탄, 디메틸논안, 3-메틸벤젠
라텍스페인트	2-프로판올, 부탄올, 에틸벤젠, 프로필벤젠, 톨루엔등
가구광택제	3-메틸펜탄, 디메틸벤젠, 프로필벤젠, 3-메틸헥탄, 에틸벤젠
폴리우레탄바닥재	논안, 디케인, 언디케인, 부탄올, 에틸벤젠, 2-메틸벤젠

(2) 실내 VOCs농도의 영향 요소

실내 공기중에는 적어도 20종에서 수백종류에 이르는 각종 VOCs물질이 존재하며 외부 공기보다는 훨씬 높은 농도를 포함하고 있다. 이 중에서 실내 공기오염으로 인하여 발생하는 건물중후군과 가장 밀접한 물질이 포름알데히드로 밝혀졌다. 포름알데히드는 과거에 주택의 단열재로 사용되던 우레아폼(urea-formaldehyde foam)으로 부터 가장 많이 발생되어 실내 공기환경의 문제를 야기하였다. 그 외에도 포름알데히드는 합판 등의 가공판넬 등에서도 많이 발생한다. 카펫트나 커튼 등의 직물류에서도 소량이지만 포름알데히드가 방출되고 있다. 실내 공기환경에서 VOCs물질의 농도는 발생원의 종류와 방출강도, 건물의 용도, 환기성능, 건물의 경과년도(준공연도)등에 따라 다르게 나타난다.

① 건물의 용도

주택, 사무소 건물등과 같이 건물의 용도에 따라 환기설비, 유지관리, 건축자재, 재실자의 활동사항등이 다르기 때문에 VOCs물질의 농도가 다르게 나타날 수 있다. 예를 들어, 사무소건물에 비하여 주택은 좁고 한정된 공간에 단열재와 합판류 등 많은 량의 마감재료가 사용되기 때문에 포름알데히드와 같은 VOCs물질의 방출량과 농도가 증가할 수 있다.

### ② 환기성능

실내의 VOCs물질의 농도는 환기량이나 환기횟수에 의하여 변화한다. 사무소 건물의 조사결과에 의하면 공기조화설비에서 외기도입을 15%로 100%로 변화시킬 때에 실내공기의 HC 물질농도(HC물질의 농도는 총 VOCs의 척도로 사용됨)의 변화는 처음 농도의 11%까지 급속히 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 VOCs물질은 항상 환기량이나 환기횟수에 반비례하여 나타나는 것은 아니다. 또 다른 조사결과에 의하면 사무소건물에서 외기도입량을 16%에서 100%로 변화시킬 경우에 VOCs물질은 최초 농도의 45%수준까지만 감소하는 것으로 나타났다. 환기량에 따라 VOCs물질의 농도가 규칙적으로 변화하지 않는 이유는 정확하게 밝혀지지 않았으나 아마도 환기의 효율과 실내온도에 따라 VOCs물질의 방출 정도가 변화하기 때문으로 이해되고 있다.

### ③ 건물의 경년 변화

건물이 준공된 연도나 사용연도는 건축재료의 사용기간을 알 수 있는 지표가 된다. 포름알데히드를 제외하면 건축재료로 부터 방출되는 대부분의 VOCs물질은 사용기간에 따라 방출강도가 급격하게 감소된다. 연구결과에 의하면 실내에서 대부분의 VOCs방출량은 6개월이 경과하면 절반 수준으로 감소하는 것으로 나타났으며, 포름알데히드는 5-6년 정도 지나야만 방출량이 절반으로 감소되는 것으로 발표되고 있다. 건물이 사용된 기간에 따라 VOCs물질의 방출량이 감소하게 되므로

신축건물의 경우에 VOCs물질의 오염농도가 높은 것을 예상할 수 있다.

### (3) VOCs 물질과 인체의 반응

실내의 총 VOCs물질의 농도는 1-2ppm이하의 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. VOCs물질이 인체에 미치는 영향은 주로 호흡기관의 자극과 두통의 원인이 되고, 신경·생리학적 기능장해 등을 유발하는 것으로 알려지고 있다. 인체에의 직접적인 영향이 나타나는 농도나 오염물질에 대한 인체의 반응 정도는 개인에 따라 큰 차이를 보인다. 따라서, 이러한 물질에 대하여 재실자가 불쾌감을 호소해야만 실내 VOCs물질에 대한 오염특성을 평가하거나 이에 대한 대책을 마련하여서는 아니된다.

여러 종류의 VOCs물질을 측정조사하여 실내의 VOCs 총농도(TVOC: Total Volatile Organic Compounds)가 1-2ppm 또는  $200-500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과할 경우에 이에 대한 주의가 요망된다. 일반적으로 TVOC의 농도가  $400\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하에서 재실자는 이에 대한 불쾌감을 호소하기 시작하고,  $600\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도에서 20%정도의 재실자가 자극을 느끼며, 가벼운 두통 등의 증상을 호소하게 된다.  $1,000\mu\text{g}/\text{m}^3$  정도의 농도에서 비로서 인간의 지각(냄새 등)으로 오염물질을 감지할 수 있는 정도가 된다. 포름알데히드는 주로 피부, 기관지, 눈의 자극 등으로 인체에 영향을 미치며, 2-10ppm정도에서 두통, 메스꺼움, 어지러움, 구토증세, 기침 등이 유발한다. 예민한 사람인 경우에는 0.1ppm 정도에서도 이러한 증상을 나타낼 수 있으며, 특히 천식환자에게는 매우 자극적인 물질이다. 또한, 동물을 대상으로 실시한 실험결과에 의하면 고농도에서 암발생을 유발하는 물질로 보고 되고 있다. 포름알데히드에 대한 실내 작업환경의 기준은 미국의

경우에 ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)의 허용한계농도(TLV: Threshold Limit Values)에서 0.3ppm(8시간 기준)으로 제한하고 있으며, 실내 공기환경의 기준은 ASHRAE 62-1989에서 0.1ppm으로 제시하고 있다. 그 외의 물질에 대한 실내농도의 기준은 일반적으로 ACGIH의 허용한계농도(TLV)의 10% 정도로 설정하고 있다.

### 3. 공기중의 유기화학물질(VOCs, SVOCs)의 측정

#### (1) 휘발성 유기화학물질(VOCs)의 측정방법

공기중의 유기화학물질에는 매우 다양하고 수많은 종류가 있기 때문에 이러한 물질들을 개별적으로 측정, 조사하는 것이 매우 어려울 뿐만 아니라 비생산적이라 할 수 있다. 기체상태의 물질을 측정하는 과정에서 대상물질을 샘플링하는 방법은 크게 2가지로 구분할 수 있다. 하나는 크라스크나 에어백, 또는 적절한 용기에 공기를 직접 샘플링하는 공기채집 방법(grab sampling)방법이며, 다른 하나는 기체상태의 물질이 흡수제나 흡착제를 통과하는 동안 매개체에 흡수 또는 흡착되어 축적시키는 방법이다. 공기채집 방법은 샘플링 시간이 불과 몇초에서 수분 정도가 소요되며, 최대농도를 파악할 경우나 농도의 분포가 시간에 따라 일정한 경우에 적용하기 알맞는 방법이다. 주로 메탄, 일산화탄소(CO), 산소 등을 측정할 때 이용하며, 샘플링한 공기는 실험실에서 그 농도를 측정한다.

특정한 화학물질을 분리하여 측정하지 않는 한 이러한 측정방법으로 낮은 농도의 VOCs 물질을 검출하는데는 어느정도의 한계가 있다. 또한 오염물질의 농도가 시간에 따라 변화하는 경우나 공기중의 농도가 매우 낮을 경우, 장시간 동안의 평균농도를 파악하고자 할 경우에는 적당하지 않으며, 이때에는 흡착제를 이용하는 방법이 적절하다고 할 수 있다.

측정 대상물질을 흡수용액에 용해시키거나 흡착제와의 반응을 유도하여 고정시키고 이를 실험실에서 분리, 분석하여 샘플링시간 동안의 평균농도를 측정하는 방법이다. 일반적으로 다른 물질과 반응하지 않는 기체상태의 물질이나 흡착되지 않는 물질은 공기채집방법을 이용하여 측정하고, 휘발성 물질이나 물에 용해되지 않는 물질들은 흡착제를 사용하는 샘플링방법을 활용할 수 있다.

휘발성 유기화학물질(VOCs)을 간편하게 측정하는 대표적인 방법으로 패시브 샘플러(passive sampler)를 이용하는 방법이다. 패시브 샘플러는 공기중 기체상태의 오염물질에 대하여 확산과 투과의 물리적 과정에 의하여 일정기간 동안에 샘플링 장치에 설치된 얇은 막에 흡착시키는 방법이며, 이를 확산형 샘플러(diffusive sampler)라고도 한다. 공기중의 오염물질이 확산과 투과의 과정을 통하여 흡착제에 흡착된 양을 가스 크로마토그래피(GC/ECD: Gas Chromatography/Electron Capture Detection 또는 GC/MS: Gas Chromatography/Mass Spectrometry)를 사용하여 농도를 분석한다. VOCs물질의 측정 방법에는 흡착제인 활성탄(activated charcoal)과 탈착제인 솔벤트(CS<sub>2</sub>)를 이용하는 기술이 널리 사용되어 왔다. 그러나 이것은 주로 산업분야의 작업공간에 검출되는 ppm(parts per million)단위의 비교적 높은 농도에서 측정할 수 있는 기술이며, 일반적인 대기환경이나 실내환경의 낮은 농도인 ppb(parts per billion)단위에서는 오차가 크기 때문에 적용하기 곤란한 측정방법으로 평가되고 있다.

1970년대 중반에 높은 온도로 가열된 복합 솔벤트를 이용하는 방법이 개발되었으며, 이것은 활성탄에 의해 흡착된 VOCs물질을 탈착시키기 위하여 열을 이용하는 방법이다. 솔벤트에 의해 탈착시키는 방법보다 분석작업이 간편하고, 작업시간이 짧으며, 흡착된 물질을 완전히 분리할 수 있는 장점을 지니고 있다.

복합 솔벤트에 의한 방법으로 가장 많이 이용하는 방법에 Tenax법이 있으며, 높은 습도에서도 측정이 가능하고, 높은 탈착온도에서도 안정되며, 재사용이 가능한 것이 장점이다. 그러나 비닐클로라이드와 메틸렌클로라이드 등의 물질은 농도가 감소된 상태로 측정된다. 또한, 아세토페논, 벨잘디하이드, 페놀 등과 쉽게 화학반응을 일으키며, 고농도의 벤젠, 스틸렌, 톨루엔 등과도 반응을 하는 단점이 있다. Tenax법은 실내공기의 VOCs물질의 농도를 측정하고, VOCs물질이 인체에 미치는 영향을 평가하는데 널리 이용되고 있다. 또한, 합성 흡착제인 Porapak Q와 XAD-2 수지를 사용하여 실내공기중의 VOCs물질을 측정하는 방법이 있다. 이 방법은 각각의 단일 흡착제가 지닌 단점을 보완된 방법이다. 1970년대 고안된 높은 농도의 측정에 사용되던 활성탄 방법도 측정시간을 연장시켜 실내환경의 농도를 측정할 수 있도록 보완되었다. 여기에는 단순히 1주-2주 정도로 샘플링시간을 연장시킴으로써 흡착된 물질의 농도를 고농도로 유지하는 방법과 샘플링한 물질에 대한 솔벤트 탈착제의 정밀도가 감소되는 것을 보완한 방법 등이 사용된다.

1986년에는 진공상태의 금속용기에 주변의 공기를 샘플링하고 이를 직접 가스크로마토그래피에 의해 분석하는 방법이 사용되었다. 이 방법을 이용하면 흡착과정과 탈착과정이 생략되므로 측정대상 물질이 흡착제와의 화학반응과 탈착과정에서 발생하는 오차를 감소시킬 수 있다. 이 방법은 1-10ℓ 정도(일정시간 이상의 공기 샘플링이 필요함)의 채집통에 모아진 공기 중에서 실제로 분석에 이용되는 공기는 1 ml 정도이며, 나머지는 사용하지 않고 버리게 된다. 공기의 채집과정에서 에어펌프나, 샘플링 튜브 등에 의하여 샘플링 공기가 오염될 수 있으며, 또한 채집용 금속통을 퍼스털 샘플러로 이용할 수 있도록 축소할 수 없는 것이 단점이라 할 수 있다.

아직까지도 대가나 실내 공기중의 VOCs물

질을 측정하는 방법에 대한 정확한 측정기준과 방법이 마련되어 있지 않으며, 미국에서는 Tenax법과 진공 금속용기에 사용한 방법이 가장 많이 사용되고 있는 실정이다.

#### (2) 반휘발성 유기화학물질(SVOCs)의 측정

반휘발성 유기화학물질은 주로 실내의 공기중에 부유분진과 결합되어 존재하며, 어떤 경우에는 기체상태로 존재하기도 한다. SVOCs 물질이 부유분진에 결합된 상태로 존재하는가 또는 기체상태인가에 따라 측정방법이 달라지게 때문에 이를 파악하는 것이 중요한 요소가 된다. 예를 들며, 공기중의 니코틴은 고체상태인 부유분진과 결합된 상태로 공기중에 존재한다고 판단하여 이를 측정할 때 기존에는 필터를 사용하였다. 그러나 최근 니코틴 성분이 공기중에 기체상태로 존재하는 것이 밝혀짐으로써 기존의 측정방법에 대한 문제점이 제기되었다. 반휘발성 유기화학물질인 공기중의 살충제 성분의 농도를 측정할 때 흡착제로써 폴리우레탄폼(PUF: Polyurethane Foam)이 사용되며, PUF를 이용하면 살충제에 함유된 50-60종류의 SVOCs물질을 측정할 수 있다. 이때, 공기의 채집은 분당 4ml 정도로 12시간 또는 24시간 동안에 실시되며, 농도의 분석은 솔벤트를 탈착제로 사용하고, 10ng/m<sup>3</sup>까지 측정이 가능한 가스 크로마토그래피를 이용한다.

### 4. VOCs물질의 제어방법

#### (1) VOCs제어방법의 종류

실내의 VOCs 농도를 감소시키는 방법에는 비휘발성 접착제를 사용한 건축자재를 선정하여 시공하고, 환기에 의하여 실내의 농도를 희석시켜야 하며, 이러한 물질을 방출하는 건축자재를 제거하는 것 등이 있다. 이 중에서 VOCs물질이 함유되지 않은 건축자재와 가구류를 사용하는 것이 가장 효과적인 제어수단이라 할 수 있다. 최근 미국에서는 건축자재

나 카펫트 생산업체 등에서 미국 공기조화협회(ASHRAE)나 환경청(FPA)과의 공동연구를 실시하여 VOCs의 방출량을 절감하려고 노력하고 있으며, 그 결과로 일부 제품의 경우에 VOCs의 방출 비율이 1/10정도로 감소시키는데 성공하고 있다.

실내의 VOCs물질의 농도를 제거하거나 희석시키기 위하여 ① 환기설비의 운전(일반환기방식, 국소환기방식), ② 공기정화설비(여과장치)의 운전, ③ 원인물질의 제거나 교체 등의 방식을 채택하여 왔다. 또한 최근에는 실내의 VOCs물질을 제어하기 위한 효과적인 수단으로 신축건물의 경우에 실내온도를 30℃ 이상으로 가열시키는 베이크아웃(bakeout)방법이 이용되고 있다. 실내 온도를 상승시킴으로써 건축자재에 함유된 휘발성 VOCs 물질의 방출이 일시적으로 촉진되어 다량의 VOCs물질을 강제로 방출시키는 방법이다. 이 방법을 이용하면 건축자재의 종류에 따라 다르지만 방출량이 10-35% 수준을 감소되고 있다. 이에 대한 방법과 효과는 다음 장에서 상세히 기술한다.

### ① 환기설비의 운전

실내공간의 VOCs물질을 제어하기 위하여 건물 전체의 환기횟수를 증가시키는 방법이 가장 일반적으로 사용되어 왔다. 이 방법은 어느 정도까지는 VOCs물질의 농도를 감소시킬 수 있지만 이에 대한 효과나 전체 환기량의 증가에 따른 에너지 소비량 증가 면에서 아직까지도 확신할 수 없는 방법이다. 환기량을 증가시킬 당시에는 오염물질의 농도가 감소되지만 환기량이 감소되면 또다시 오염물질이 방출되어 실내에 정체하게 된다. 또한 건물 전체의 환기성능에 따라서도 제거효율이 크게 변화할 수 있다.

국소환기방식은 여러 건물에서 부분적으로 채택하고 있는 방법이다. 예를들어 화장실의 배기, 흡연실, 복사실, 사진인화실, 주방등에서 국소환기방식을 채택하고 있으며, 부분적

으로 발생하는 오염물질을 제거하기 위한 효과적인 방식으로 평가되고 있다.

### ② 공기정화설비의 운전

공기정화기에 의하여 공기를 여과시키는 방법은 VOCs물질의 제거에 큰 효과가 없는 것으로 평가되고 있다. 솔벤트와 같은 흡착성 물질을 함유한 활성탄 필터를 사용하면 VOCs물질이 흡착되지만 이에 의한 제거량은 매우 제한되어 있다. 좁은 공간에서 방출되는 오염물질을 제거하기 위한 수단으로써 적용되는 방법이며, 건물 전체에 적용할 경우에 제거성능이 낮고 비용이 많이 소요되기 때문에 채택하기 곤란한 방법이다. 그러나 부분적으로 발생하는 오염물질을 제거하는 방법으로 가장 확실한 수단이 될 수 있다.

### ③ 원인물질의 제거 및 교체

오염발생원을 근본적으로 제거하거나 교체함으로써 결과적으로 실내의 오염물질 농도를 감소시킬 수 있다. 이때에는 2차적인 오염물질의 방출에 의한 실내 농도의 증가에 주의하여야 한다. 예를 들어 포름알데히드를 방출하는 내장 판넬재료를 제거하였을 경우에도 이로부터 방출된 오염물질이 이미 실내의 커튼, 카펫트, 천장재료나 직물류의 내장재료에 흡수되어 있으며, 이것이 2차적으로 실내공기로 재방출될 수 있다. 오염발생원을 제거하거나 새로운 재료로 교체하는 데는 많은 비용과 노력이 소요된다. 단순히 VOCs물질을 방출하는 카펫트의 접착재만을 제거할 경우에도 카펫트 전체를 제거하고 새로운 것으로 교체하여야 하며, 이에 따라 많은 자재비와 인건비 등이 지출되어야 한다. 그러므로, 이러한 재료에 대한 오염물질의 발생특성을 미리 파악하고, 건축시공이나 내장공사 과정에서 안전한 재료를 선정하는 것이 가장 바람직한 방법이다. 그러나 현재로서는 각종 건축자재에 대한 VOCs 물질의 발생량에 대한 자료들이 명확하지 않은 실정이다.



또한 오염물질의 발생원에 대한 발생량의 조정이 효과적인 방법으로 채택되고 있다. 건축공사시 각종 접착재나 실링재료를 적절하게 선정하여 오염물질의 발생량을 감소시키며, 신축건물에 대하여 입주시기를 늦추는 것도 VOCs물질의 발생량을 조정하는 방법이다.

## (2) 베이크아웃(bakeout)방법

신축건물이나 보수작업이 끝난 건물에 대하여 실내공기를 높은 온도로 가열하여 오염물질의 발생량을 일시적으로 증가시킨 후에 이를 제거하는 방법이며, 이를 가열하는 방법을, ‘베이크아웃(bakeout)’ 방법이라 한다. 신축건물에 대하여 입주전에 실내의 온도를 상승시켜 건축자재나 마감재료에서 방출되는 VOCs물질의 발생량을 일시적으로 촉진시키며, 환기장치를 가동하여 이를 제거하는 방법을 의미한다. 이 방법은 실내의 VOCs물질을 제거하는 가장 효과적인 방법으로 알려져 있으며, 이에 대한 평가자료(적정 기간, 적정 실내온도, 환기횟수 등)는 아직도 미흡한 실정이다.

여기서 미국에서 신축된 5개의 사무소 건물을 대상으로 ① 실내온도, ② 실행기간, ③ 환기횟수 등을 변화시키면서 실시한 평가자료를 소개한다. 베이크아웃의 실행기간은 소요비용과 현장의 실무적인 제한사항에 따라 변할 수 있다. 건물의 준공시기를 맞추고, 비용 절감을 위해서는 작업기간이 짧을수록 유리하지만, VOCs물질의 적정한 제거율을 확보하기 위해서는 작업기간이 길수록 유리하다. 건물 자체의 열용량이 크고, 일부재료(단열재 등)는 열전도율이 낮기 때문에 실내를 적합한 온도로 상승시키고 이를 일정기간 이상으로 유지하는데 상당한 시간이 소요될 수 있다. 예를 들어 카펫과 카펫트 접착재료의 온도를 상승시키기 위해서도 그 아래쪽 재료인 콘크리트 슬라브층도 함께 가열하여야 하므로 상대적으로 많은 시간이 소요될 수 있다. 대부분의 경우에 작업시간에 제한이 있으므로 실내 상승온

도가 높을수록 VOCs물질의 제거에 효과가 크게 나타난다. 또한, 소요비용을 절감하기 위해서는 별도의 가열장치를 설치하지 않고 난방설비를 최대 용량으로 운전하는 것이 바람직하며, 건물에 설계된 난방설비의 용량이 한정될 경우에는 작업기간을 연장시키는 것이 효과적일 수 있다. 한편, 실내온도를 갑자기 상승시킴으로써 건축구조재나 마감재료에 손상을 줄 수 있으므로 주의하여야 한다. 목재의 경우에 트거나 뒤틀림이 발생할 수 있으며, 철골조의 신축이음 부분에 문제가 발생할 수 있다. 유리창의 균열, 페인트의 표면이 일어나는 등의 손상이 발생할 수 있으므로 실내 상승온도를 너무 높게 설정하는 것은 바람직하지 않다.

작업 도중에 환기설비는 연속적으로 운전하여 실내의 VOCs물질을 제거하여야 한다. 그렇지 않으면 실내에 방출된 오염물질이 다른 재료에 흡착되었다가 다시 재방출하게 되는 2차발생원을 형성하는 경우도 있다. 그러므로 실내 상승온도에 따라 적절한 환기량을 유지하여야 한다. 실내온도를 상승시키는 가열 과정에는 외기도입량을 최소로 유지하고, 재순환 공기량은 최대로 유지하는 것이 건물 전체를 일정한 온도로 고르게 상승시키는데 도움이 된다. 이 방법에 따른 전체 소요경비는 실내공기의 온도를 상승시키는데 필요한 건물의 난방비용을 포함하여 조명, HVAC 시스템의 조정비용과 작업도중에 건물의 조사, 관찰을 위한 인건비 등이 소요된다. 건물을 조사, 관찰하는 것은 베이크아웃 작업 도중에 건물에서 발생할 수 있는 건축재료나 설비의 손상등을 조사하기 위한 것이다.

## (3) 베이크아웃의 방법 및 순서

베이크아웃 방법은 실내 공기환경의 문제가 발생한 건물이나 신축건물을 대상으로 VOCs물질의 발생량을 인위적으로 증가시켜 일시에 많은 량을 제거하기 위한 방법으로 활용되고 있다. 이방법을 실행하는 시기는 기존건물의

경우에 재실자가 없는 주말을 이용하고, 신축 건물에 대해서는 입주 직전에 실시하게 된다. 경비의 절감을 위하여 작업시기는 실내의 온도를 상승시키기 쉬운 여름철에 선정하는 것도 바람직하다.

난방설비를 최대용량으로 운전하여 실내온도를 적정한 설정치까지 정해진 짧은 시간 동안에 상승시킬 수 있도록 한다. 이때 보일러의 용량이 부족할 경우에는 보일러 공급온수의 온도를 상향 조정하여야 하며, 전기난로와 같은 보조난방기구를 활용할 수도 있다. 실내에 자동온도조절장치(thermostat)가 설치된 경우에 실내의 설정온도를 높게 조정하거나, 이것이 불가능한 경우에 난방설비와의 연결을 차단하여 실내온도를 상승시킬 수 있도록 한다.

실내의 설정온도는 작업기간에 따라 다르며, 일반적으로 30℃-40℃범위를 유지하는 것이 적당하다. 작업이 진행되는 동안 실내의 온도와 습도를 측정하고, 외기취입용 댐퍼와 재순환공기의 댐퍼를 적절하게 조정한다. 작업 초기에는 공기조화설비의 외기취입량을 최소한으로 제한하고, 내부발열을 이용하기 위하여 조명기구는 모두 켜놓는 것이 좋다. 건물 내부의 공기순환을 원활하게 유지하기 위하여 재순환공기량(recirculation air volume)을 증가시키고, 실내의 출입문은 모두 열어놓는다. 작업기간 동안에 건물의 온습도를 측정, 조사하여 실내온도의 상승 정도를 확인한다. 또한, 작업의 진행 전에 재실자에게 이에 대한 정보를 제공하여 높은 열에 손상을 받을 수 있는 물품(예, 화장품, 화초, 식물류 등)을 사전에 옮겨 놓도록 요구한다. 포름알데히드를 포함한 대표적인 VOCs물질에 대하여 베이क्र아웃의 전과 후, 작업도중의 농도를 측정 조사한다. 또한 VOCs물질의 실내 발생정도를 확인하기 위하여 작업이 완료된 후에도 일정기간(1일, 1주일, 1달, 4달)동안에 오염물질의 농도를 측정하여 그 결과를 확인한다.

#### (4) 베이क्र아웃 방법의 효과

베이क्र아웃에 의한 총 VOCs물질의 감소량은 작업의 기간과 실내 설정온도에 따라 다르며, 공기조화설비의 난방성능과 환기성능에 의하여서도 결과가 다르게 나타날 수 있다. 베이क्र아웃에 의하면 실내의 VOCs 물질이 20%-30%정도의 수준으로 감소된 것으로 조사되고 있다. 신축건물에 대한 베이क्र아웃 도중에 작업자들이 강한 냄새와 눈의 따가움을 느낄 수 있으며, 이것은 VOCs물질이 일시에 다량으로 방출되었기 때문으로 이해할 수 있다. 베이क्र아웃 과정에서 실내의 VOCs물질의 농도는 13mmg / m<sup>3</sup> (3.5ppm)까지 측정, 조사되었으며, 이것은 외부공기 농도의 35배에 해당하는 높은 값을 나타낸다. 베이क्र아웃이 끝난 다음날에 대한 총 VOCs물질의 농도는 평균 65%가 감소되었다. 이것은 건축 구조물의 온도가 높은 상태에서 다소 높은 VOCs농도를 방출한 것으로 이해되며, 온도가 냉각될 경우에는 더욱 낮은 농도로 검출될 것으로 예상할 수 있다. 작업 후 1개월이 경과된 때의 총 VOCs물질의 농도는 작업전의 평균농도에 비하여 6%만이 측정 조사되었다.

베이क्र아웃에 의한 결과로 VOCs물질중의 포름알데히드 농도는 거의 감소되지 않은 것으로 조사되었다. 포름알데히드는 주 발생원인 합판을 포함한 많은 건축재료에 함유된 물질이다. 포름알데히드는 다양한 재료로부터 방출되고, 발생원의 층이 매우 두터울 뿐만 아니라 어떤 경우에는 발생원이 재료의 내부에 존재하고 표면에는 다른 재료로 처리되어 있기 때문에 단 며칠동안의 베이क्र아웃 작업으로는 이를 제거하기는 어려운 것으로 판단되어진다. 베이क्र아웃을 통하여 건축재료의 표면에 존재하는 VOCs물질만이 방출되고 포름알데히드와 같이 재료의 전체층에 두텁게 존재하는 발생원에 대해서는 큰 효과가 없는 것으로 분석되고 있다. 포름알데히드를 제거하는데 큰 효과가 없다고 하여 베이क्र아웃 작업

이 의미가 없는 것은 아니다. 실내의 VOCs물질로 인하여 야기되는 실내환경의 오염 중에서 포름알데히드가 차지하는 부분은 일부분에 지나지 않는다.

한편, 실내온도의 가열로 인하여 페인트나 코킹재료의 균열, 유리창의 균열, 목재류나 신축이음 등의 뒤틀림이 발생할 수 있으므로 주의하여야 한다. 베이크아웃 방법을 이용할 경우에 계절별로 다르지만 많은 경비가 소요된다. 이작업은 여름철에 실시하는 것이 실내온도를 상승시키기 쉽기 때문에 경비를 절감할 수 있다.

## 5. 맺음말

최근 건축공사에는 많은 종류의 시공재료들이 사용되며, 소재 산업의 기술발달과 더불어 합성재료의 사용이 급격히 증가하고 있다. 합성재료는 다량의 휘발성 유기화학물질(VOCs)을 실내공기 중으로 방출하고 있으며, 이는 실내 공기오염의 주요 원인으로 작용하고 있다. 대부분의 VOCs물질은 낮은 농도로 서서히 오랜시간 동안에 공기 중으로 방출하며, 농도가 낮아 검출이 쉽지 않은 것이 특징이다. VOCs물질은 재실자에게 불쾌한 냄새, 호흡기의 자극 뿐만 아니라 피로감, 메스꺼움, 또는 집중력 감퇴 등을 유발하며 일부 VOCs물질은 발암성 물질로 밝혀졌으며, 재발성 질병의 원인물질도 포함하고 있어 이러한 물질에 대한 대책이 신중히 검토되어야 한다.

실내 공기환경에 대한 VOCs물질의 종류와 특성을 파악하고, 환기설비의 성능을 고려하여 실내공기의 질을 제어하여야 안전하고 쾌적한 생활공간을 조성할 수 있다. 또한 신축 건물에서 VOCs물질을 효과적으로 제거하기 위하여 건물의 준공과 더불어 특수 환기계획을 마련하고, 입주전에 환기설비의 충분한 운전을 실시하여 오염물질을 제거하는 것이 바람직하다. 신축건물이나 보수공사에 의하여 새롭게 시공된 건축자재로부터 방출되는 휘발성 VOCs물질을 제거하는 데는 베이크아웃

방법이 가장 효과적인 것으로 판단된다. 실내 공기의 온도가 높을수록, 작업시간이 길수록 VOCs물질의 발생을 촉진시켜 효과적이다. 이때, 실내온도를 고온으로 가열함으로써 실내의 온도변화와 습도변화로 인하여 건축내장재료와 건물자체에 손상이 발생할 수 있다. 특히, 유리창의 균열, 페인트 도색이나 벽체 마감재의 균열 등이 발생할 수 있으므로 주의하여야 한다.

실내 공기환경에서 VOCs물질의 발생을 억제하고 제어하기 위해서는 건축자재의 방출강도와 방출량을 참조하여 적절한 건축자재의 선정과 시공방법을 검토하여야 한다. 그러나 합판이나 카펫트등 대표적인 제품을 제외하면 건축자재에서 방출되는 물질에 대한 종류와 특성은 아직도 보편화 되지 않은 상태이며, 이러한 특성을 파악하기 위한 연구가 필요하며, 실내의 VOCs물질의 방출량을 제어하고, 실내의 오염농도를 감소시키기 위한 방법이 마련되어야 할 것이다.

## 참고문헌

1. Lance A. Wallace: Volatile Organic Compounds, Indoor air Pollution pp.252 - 271,
2. Hal Levin: Building Materials and Indoor Air Quality, State of the Art Reviews pp.667-693, Occupational Medicine 1989. 10.
3. John R. Girman: Volatile Organic Compounds and Building Bake-Out, State of the Art Reviews pp.695-712, Occupational Medicine 1989. 10.
4. Jacek Namiesnik ect.: Indoor Air Quality, Pollutants, Their Sources and Concentration Levels, Building and Environment Vol. 27, No. 3 pp. 339-356, Pergamon Press, London, 1992.
5. Jonathan M, Samet, John D. Spengler: Indoor Air Pollution, The Johns

- Hopkins Univ. Press, U.S. A., 1991.
6. ACGIH: Advances in Air Sampling, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Lewis Publishers Inc., U.S.A, 1990
  7. Susanne V. Hering: Air Sampling Instruments, American Conference of Governmental Industrial Hygienists Inc., U.S.A, 1989.