

목질복합재료와 실내공기질*1

이 영 규*2 · 양 한 승*3 · 김 현 중*3†

Wood Based Composite and Indoor Air Quality*1

Young-Kyu Lee*2 · Han-Seung Yang*3 · Hyun-Joong Kim*3†

1. 실내공기질에 관한 개요

1.1 실내공기질 관리 배경 및 목적

현대 사회에서는 실내환경에 대한 관심이 크게 증가하고 있고 특히 주택의 구조나 사용되고 있는 건축 재료는 크게 바뀌어 왔다. 신축·개축 후의 주택, 사무실 등에서는 냉·난방, 단열 등 에너지 절약 대책의 이유로 실내공간의 고기밀화가 되어 가고 있다. 또한 실내공간내의 내장재, 가구 등에서 다양한 화학물질이 사용됨에 따라 화학물질의 방산에 의한 실내공기 오염으로 거주자들에게 나타나는 다양한 건강 이상 증상에 대해서 보고되고 있다. 이처럼 실내공기오염의 중요성은 인간이 실내에서 생활하는 시간이 하루 중 90% 이상을 차지하고 있으며, 실내공기질은 재실자들의 건강에 직접적으로 영향을 미치지 때문이다. 실내오염의 실례로 빌딩증후군 또는 신축빌딩 증후군(Sick Building Syndrome : SBS)의 원인은 주택의 에너지 절약 대책을 위해서 기밀화, 단열화가 진행

된 결과 실내 환기의 저하를 불러 실내공간에서 발생하는 화학물질 농도의 증가에 따른 건물내 거주자들이 일시적 또는 만성적인 건강과 관련된 다양한 증상을 말한다. 아직까지 의학적으로 정의된 변명은 아니다. 그 원인물질로는 사람들의 여러 가지 실내활동, 실내건축에 사용되는 마감재료, 생활용품 등에서 배출되는 것으로 주요 오염물질로는 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 이산화질소(NO₂), 아황산가스(SO₂), 오존(O₃), 미세먼지(PM10), 중금속(Heavy metal), 석면(Asbestos), 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds : VOCs), 포름알데히드(HCHO), 미생물성물질(microbic substance), 라돈(Rn) 등이 있다(이 등, 2002; 김 등, 2001; 한국대기보전학회, 1998).

신축빌딩 증후군이라는 용어는 1970년대에 미국에서 사용되기 시작해 이것이 일본의 화학물질과 민증과 더불어 오늘날 신축빌딩 증후군이 새로운 환경용어로 알려지게 되었다. 일본에서는 실내에 장기간 거주하는 사람에게 나타나는 증상으로 머리가 무겁고 목이 아프거나 기분이 나빠지는 증상들을 유발하는 주택의 개념인 썬크하우스(Sick House) 문제가 부각

*1 접수 2003년 8월 5일.

*2 서울대학교 농업과학공학동기기센터 National Instrumentation Center for Environmental Management, Suwon 441-744

*3 서울대학교 임산공학과 Lab Of Adhesion & Bio-Composites, Department of Forest Products, Seoul National University, Seoul 151-742, S. KOREA

† 주저자(corresponding author) : 김현중(e-mail: hjokim@snu.ac.kr)

되고 있다. 1996년 5월 중의원에 씨크하우스에 대한 문제가 상정되었고, 1996년 7월 건설성, 후생성, 통산성을 중심으로 건강주택연구회가 조직되어 주택의 화학물질 오염에 대한 지침이 제정되었고 2002년에 건축기준법을 개정했으며, 2003년 7월 1일로 건축재료의 VOC, 포름알데히드 및 카보닐화합물 방산측정법(JIS A1901)이 시행됐다.

한편 우리나라 환경부는 1989년 지하공간 환경기준치를 설정한 이후, 1995년도에 “실내공기질 통합관리법”의 입법화를 추진하였으나 관계부처간의 이견으로 무산되었다. 이에 1998년부터 일부 기준치를 개정하여 지하공간에 대한 관리기준을 강화하였다.

그러나 2003년 제238회 임시국회에서 “다중이용시설등의 실내공기질 관리법”이 통과됨에 따라 그동안 방치되어 왔던 아파트, 도서관, 터미널, 상가, 공동주택 등의 실내에서 발생하는 포름알데히드와 휘발성유기화합물(VOCs) 등 인체에 해로운 오염물질에 대한 규제가 이루어지게 됐다. 이 법안은 공포 후 1년 후인 2004년 5월에 시행된다.

이 법이 내년 5월 시행되면 현재 목재산업은 여러 가지 변화를 겪게 될 것으로 예상된다. 합판 및 보드 산업에서 인체에 무해한 제품생산과 해외에서 수입되는 합판과 보드류도 국내 규정에 적합한 것으로 수입되어야 하기 때문에 생산단가와 수입단가가 증가할 것이다. 또한 목질복합재 산업 전반에 걸쳐 사용하는 접착제에서 발생하는 포름알데히드 방산량을 줄여야 하는 문제가 발생한다. 가구산업과 마루바닥재 산업 또한 예외가 될 수 없다.

그러므로 본고에서는 실내공기 오염과 목질복합재료와의 연관성을 새롭게 조명함으로써 내년에 시행될 “다중이용시설등의 실내공기질 관리법”에 효율적인 대응법과 전략의 토대가 되었으면 한다.

2. 실내오염물질과 영향

2.1 실내오염물질과 발생원

실내에서 발생하는 오염물질로는 입자상 오염물질과 가스상 오염물질, 병원성세균 등으로 크게 분류할

수 있다. 입자상 오염물질로는 미세먼지(PM10), 중금속(Heavy metal), 석면(Asbestos) 등이 있으며, 가스상 오염물질로는 물질의 연소과정에서 주로 발생하는 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO₂), 아황산가스(SO₂)와 사람의 호흡에 의해 발생하는 이산화탄소(CO₂) 그리고 건축자재에서 많이 발생하는 휘발성유기화합물(VOCs), 포름알데히드(HCHO), 라돈(Rn), 악취(Odor) 등이 있다. 또한, 병원성세균(Microbe)으로는 실내공기 중에 부유하는 부유세균과 낙하세균 등이 있다. (이 등, 2002)

실내오염의 발생원으로는 연소과정, 실내에서의 흡연, 오염된 외부공기의 실내유입 등이 있으며, 최근에는 신축아파트의 경우 건축물의 밀폐화와 단열화를 위해 사용되는 내장재와 바닥의 소음 저감을 위해 사용하는 카펫 등의 건축자재로부터 수많은 유해화학물질이 발생되고 있다. 또한, 건축물의 유지와 관리 등 일련의 과정에 사용되는 방한제, 목재 보존제, 왁스 등도 실내오염의 중요한 발생원이다. 이러한 실내오염물질은 사람들의 호흡기와 순환기에 영향을 미치며, 특히 VOCs 중의 벤젠, 1,3-부타디엔 등의 일부 물질은 발암성을 내포하고 있다 (이 등, 2002). 실내에서 발생하는 주요 오염물질의 발생원 및 인체의 영향은 Table 1과 같다 (이 등, 2002; 김 등, 2001; 김 등, 1999).

WHO에서는 WHO와 유럽연합(EU)이 공동으로 작성한 “공기질의 가이드라인”을 기초로 1997년 Expert Task Force회의에서 공기질의 가이드라인(Guideline For Air Quality)을 작성하였다. 이 중에서 실내공기질에서는 주요한 오염물질과 발생원을 정하였으며, 오염물질의 발생원에서는 실외, 실내·실외, 실내의 3분류로 구분하였다. Table 2는 WHO와 EU가 정한 주요 오염물질과 예시를 나타내었다.(이 등, 2002; 김 등, 1999).

3. 신축빌딩 증후군

[신축빌딩 증후군] (SHS: Sick House Syndrome)이라는 용어는 아직 명확한 정의는 없고 확인된 것은 아니지만 이 현상은 신축 집과 실내를 리모델링 한 주택에 살기 시작한 순간 목과 콧속이 아프거나 혀가 하얗게 된다거나 눈이 따끔따끔 아프게 되는 등 건강을

Table 1. 실내오염물질의 발생원 및 영향

오염물질	주요 발생원	인체영향
먼지, 중금속	대기 중 먼지가 실내로 유입, 실내 바닥의 먼지, 생활활동 등	규폐증, 진폐증, 탄폐증, 석면폐증 등
석면	단열재, 절연재, 석면타일, 석면브레이크, 방열재 등	피부질환, 호흡기질환, 석면증, 폐암, 중피증, 편평상피 등
담배연기(각종가스, HC, PAHs, 먼지 등)	담배, 필러 등	두통, 피로감, 기관지염, 폐렴, 기관지천식, 폐암 등
연소가스(CO, NO ₂ , SO ₂ 등)	각종 난로, 연료연소, 가스렌지 등	만성 폐질환, 기도저항 증가, 중추신경 영향 등
라돈	흙, 바위, 지하수, 화장암, 콘크리트 등	폐암 등
포름알데히드	각종 합판, 보드, 가구, 단열재, 소취제,담배연기, 화장품, 옷감 등	눈, 코, 목 자극증상, 기침, 설사, 어지러움, 구토, 비염, 피부질환, 정서불안증, 기억력 상실 등
미생물성물질(곰팡이, 박테리아, 바이러스, 꽃가루 등)	가습기, 냉방장치, 냉장고, 애완동물	알레르기성 질환, 호흡기질환 등
휘발성유기화합물(VOCs)	페인트, 접착제, 건축자재, 스프레이, 연소과정, 세탁소, 의복, 방향제, 왁스 등	피로감, 정신착란, 두통, 구토, 현기증, 중추신경 억제작용 등
악취	외부 악취가 실내로 유입, 체취, 음식물의 부패 등	식욕감퇴, 구토, 불면, 알레르기증, 정신신경증 등
오존	복사기기, 생활용품, 연소기기	기침, 두통, 천식, 알레르기성 질환

Table 2. WHO와 EU에서 정한 실내공기오염의 주요 오염물질과 발생원

구분	주요 오염물질	발생원
실외	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
실내·실외	NO _x , CO	연료의 연소
	CO ₂	연료의 연소, 대사작용
	SPM & RSP	담배연기
	수증기	생물적 활동, 연소, 증발
	VOCs	휘발작용, 연료의 연소, 도료, 대사작용, 살충제, 방향제
	포자	균류
실내	라돈	나무, 건축재료, 물
	포름알데히드	건축재료, 가구, 담배연기
	석면	난연성 물질, 절연재료
	NH ₃	대사작용
	PAH, As	담배연기
	VOCs	접착제, 건축자재, 용제, 요리, 화장품
	먼지	방향제, 도료, 수은 함유제품에서 방출
	알레르기	애완용 동물의 털, 진드기
	미생물	전염병

Table 3. 포름알데히드가 실내에 방산 할 가능성이 있는 종류와 그 함유성분

	건축자재(목질복합재)	포름알데히드를 함유 할 가능성이 있는 접착제
구조재	집성재	레졸시놀계 접착제
벽체	합판, 파티클보드	요소, 페놀, 멜라민계 접착제
내장 및 바닥재	합판, 파티클보드	요소, 페놀, 멜라민계 접착제
단열재	단열재	유리섬유 압면 접착제

해치는 증상을 말하고 이와 같은 신체의 변화를 호소하는 사람이 늘고 있다.

한 번 집에서 떨어져 지내면 이 증상이 나아진다. 한 편 집에 들어가면 다시 같은 증상이 재발한다. 이것이 [신축빌딩 증후군]이라 불리는 것이다.

이 원인으로 벽지(실제로 염화비닐이 주류)에 포함된 가소제와 벽지를 붙이기 위해 사용된 접착제, 목재 방부제, 커텐 류에 포함된 난연제, 가구, 목질건자재, 바닥재 및 합판에 사용되고 있는 포르말린계 접착제와 목질건자재의 시공에 사용되는 접착제, 내장 등에 사용되는 수지계 도료, 왁스 등에 포함되어 있는 휘발성의 화학물질과 입상의 부유물질, 곰팡이, 진드기의 분비물, 애완동물의 털, 그 이외의 물질이 원인 혹은 계기가 된다고 되어 있다.

화학물질은 우리 생활에 가는 곳마다 사용되고 있다. 집의 건자재와 내장재료, 가구 등에 사용되는 접착제, 도료, 왁스를 시작으로 방향 스프레이, 화장스프레이, 살충제 스프레이, 전기식 모기 메트, 결국은 난방기구나 식기에 이르기까지 우리의 주위에는 화학물질이 참 많고 이제는 화학물질 없이는 오늘날의 생활은 생각할 수 없다.

이와 같은 생활양식에 있어서 우리의 신체는 어떤 화학물질에 의한 영향을 받고 있다.

그 대표적인 것이 주택 내장 건자재와 가구에서 나오는 화학물질에 의한 건강장해로써의 [신축빌딩 증후군]이 있다.

4. 실내공기질과 목질복합재

4.1 포름알데히드 (HCHO)

오늘날 이용되고 있는 목질복합재료는 합판, MDF,

OSB, 파티클보드, 섬유 및 집성재의 제조에는 반드시 접착제가 이용되고 있고 여기서 이용되는 접착제의 대부분에 포름알데히드가 포함되어 있다. 즉 이들 건자재를 제조하기 위해서는 요소수지, 멜라민수지, 페놀수지, 레졸시놀 수지가 기본으로 이용되고 있다. 포름알데히드는 분자량 30.03으로 비중 0.815, 끓는점 -19.5℃, 녹는점 -92℃을 지닌 상온에서 자극적인 냄새를 가진 무색의 기체로써 37% 수용액을 포르말린이라고 부른다.

포름알데히드 계 접착제인 요소수지를 이용한 목질복합재료 제조 과정 중 포름알데히드는 목질원료와 접착제의 혼합과정부터 시작하여 열압공정을 거쳐 최종생산물에서 방산이 일어나는데, 이때 방산되는 포름알데히드는 접착제 제조시 요소와 반응하지 않고 유리 상태로 남아 있던 유리 포름알데히드와 경화과정 중 접착제의 dimethylene ether 결합이 dimethylene 결합으로 진행되면서 방산되는 포름알데히드이다. 이러한 포름알데히드는 제조과정 중에만 방산되는 것이 아니라 사용 중인 제품에서도 경화된 접착층에서 메틸렌 결합의 산 가수분해 [RNH-CH₂-OCH₂-HNR → RNH-CH₂-NHR + HCHO]에 의한 잠재 포름알데히드가 서서히 방산된다 (김 등, 2002).

Table 3은 포름알데히드가 실내에 방산할 가능성이 있는 종류와 그 함유성분을 나타냈다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 F/U물비를 조절하거나 페놀이나 MDI 수지로의 대체 등을 통해 해결할 수 있지만 이에 따른 접착물성의 저하나 경제성 등을 고려할 때 쉬운 일이 아니다.

포름알데히드의 인체에 미치는 영향은 독성 정도에 따라 흡입, 흡수, 피부를 통한 경로로 침투되고, 이 중 흡입에 의한 독성이 가장 강하게 나타나는 것으로 알려져 있다. 포름알데히드는 그 농도가 1 ppm 또는 그 이하에서 눈, 코, 목의 자극 증상을 보이며, 동

Table 4. 포름알데히드가 인체에 미치는 영향

농도 ppm	발생하는 증상
0.01~16	눈의 자극이 시작되는 최저 값
<0.04	신경조직의 자극이 시작됨
0.05~10	냄새가 느껴지는 최저 값
0.08~16	눈과 코에 자극
0.08	WHO, 일본의 기준 값 (지침 값)
0.1	독일의 최소 오염농도
0.25~0.33	호흡장애의 시작
0.5	목의 자극이 시작되는 최저 값
2~3	눈을 찌르는 듯 아파짐
10~20	심하게 눈물이 남
30~	생명이 관계된 위험, 독성 폐수중

물 실험에서는 발암성(비암)이 있는 것으로 나타났다. Table 4 는 포름알데히드(HCHO)의 농도에 따른 인체영향을 나타낸 것이다 (이 등, 2002; 김 등, 1999).

4.2. 휘발성유기화합물 (VOCs)

4.2.1. 휘발성 유기화합물(VOCs)의 정의 및 분류

휘발성 유기화합물(VOCs)은 수많은 유기화합물의 총칭으로 발생원이 매우 다양하며 각 나라마다 VOCs에 대해 조금씩 다르게 정의하고 있다. VOCs는 상온, 상압에서 액체상이나 고체상으로 존재할 수 있지만 대기 중에서는 가스상으로 존재하는 모든 유기화합물 질로 정의할 수 있으며, 20°C에서 760 torr(101.3 Kpa) 보다는 작고 1 torr(0.13 Kpa)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 (한국공기정정협회, 2000).

미국 환경청 EPA(Environmental Protection Agency)에 의하면 VOCs는 일산화탄소, 이산화탄소, 탄산, 금속성 탄산염 및 탄산 암모늄을 제외한 탄소화합물로서, 대기 중에서 태양광선에 의해 질소산화물(NOx)과 광화학적 산화반응을 일으켜 지표면의 오존 농도를 증가시켜 스모그현상을 일으키는 유기화합물

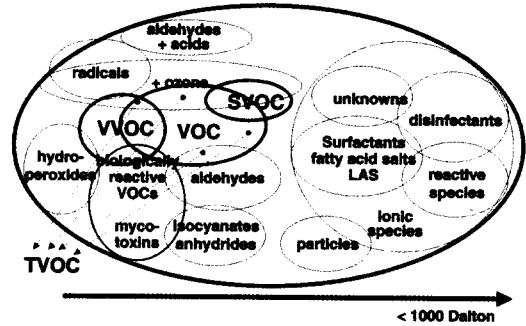


Fig. 1. 실내공기 중에 포함되어 있는 VOCs (Wolkoff & Nielsen, 2001).

질로, 벤젠, 톨루엔, 프로판, 부탄, 헥산 등 광화학반응성이 에탄보다 큰 318종의 물질과 이들 물질이 포함된 진증기압(True Vapor Pressure : TVP)이 1.5 psia 이상인 석유화학제품 및 유기용제 등을 말하며, 메탄, 에탄, 메틸클로라이드, 메틸클로르포름, 클로르플로르탄소류 및 퍼플로르탄소류 등과 같이 광화학반응성이 낮은 화합물은 제외하고 있다.

유럽에서는 레이드증기압이 27.6 kPa(4.01 psia) 이상되는 석유류 제품(첨가제 유무에 무관) 중 액화 석유가스를 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 할로겐화 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.

일본에서는 탄소화합물 중 일산화탄소, 이산화탄소, 탄산 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°C 이하인 물질과 혼합물질은 1기압에서 5퍼센트 유출점이 섭씨 150°C 이하인 물질을 말하며, 일산화탄소, 이산화탄소, 탄산 및 그 염류, 메탄, 에탄, 트리클로로에탄 및 트리클로르트리플로르에탄 등 광화학반응성이 없

Table 5. 실내에서 발생하는 VOCs 물질과 발생원

VOCs 물질		주요 발생원
벤젠	파티클보드, 섬유판, 합판, 세척 및 청소용품, 페인트 제거제, 접착제	
디클로로벤젠	방향제, 썬약	
펜타클로로벤젠	목재보존제, 곰팡이제거제, 제충제	
부틸아세테이트	락커	
톨루엔, 자일렌	페인트, 바닥용 왁스, 니스, 염료착제, 등유용 난방기구, 벽지	
스티렌	담배연기, 코킹제, 발포형 단열재, 섬유형 보오드	

는 물질은 제외하고 있다.

휘발성 유기화합물은 물질의 존재 상(Phase)의 형태에 따라서 휘발성(Volatile), 반휘발성(Semi-Volatile), 비휘발성(Non-Volatile)으로 구분하며 증기압이 10^{-2} KPa 이상을 VOCs, $10^{-2} \sim 10^{-8}$ KPa을 SVOCs, 10^{-8} KPa 이하를 NVOCs로 분류한다. 또한, WHO에서는 비등점에 의해 고휘발성(Very Volatile), 휘발성(Volatile), 반휘발성(Semi-Volatile), 고형상태(POM)로 구분하며, 비등점이 $0^{\circ}\text{C} \sim (50^{\circ}\text{C} \text{ or } 100^{\circ}\text{C})$ 의 경우 VVOCs, $(50 \text{ or } 100^{\circ}\text{C}) \sim (240 \text{ or } 260^{\circ}\text{C})$ 를 VOCs, $(240 \text{ or } 260^{\circ}\text{C}) \sim (380 \text{ or } 400^{\circ}\text{C})$ 를 SVOCs, 380°C 이상을 POM(Particle-bond Organic Compounds)으로 분류하고 있다 (한국공기청정협회, 2000; Wolkoff · Nielsen, 2001).

4.2.2 휘발성 유기화합물(VOCs) 방산

휘발성 유기오염물질은 미국환경보호청에서 지정한 129 개의 중요한 오염물질 중에 31개에 해당하고 있다 (환경부, 1998).

휘발성유기화합물(VOCs)은 증기압이 높아 대기중으로 쉽게 증발되고, 물질에 따라 인체에 발암성을 보이고 있으며, 실내에서의 VOCs 발생원으로는 목질 복합재료를 사용하는 건축자재와 마감재료나 실내시공시의 접착제, 커튼, 카펫, 난방기기, 살충제, 방향제, 흡연 등이다.

실내에서 발생하는 VOCs 물질과 발생원은 Table 5와 같다 (이 등, 2002; 김 등, 1999).

VOCs의 인체영향으로 벤젠은 호흡을 통해 약 50%가 인체의 흡수되며, 아주 작은 양이지만 피부를 통해

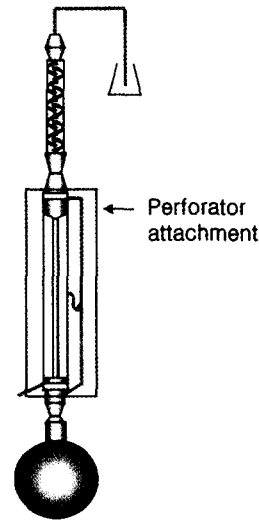


Fig. 2. 퍼포레이터 법.

침투되기도 한다. 체내에 흡수된 벤젠은 주로 지방조직에 분포하게되며, 급성중독일 경우 마취증상이 강하게 나타나며 호흡곤란, 불규칙한 맥박, 졸림 등을 초래하여 혼수상태에 빠진다. 만성중독일 경우 혈액장애, 간장장애, 재생불량성 빈혈, 백혈병을 일으키기도 한다. 톨루엔 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. 자일렌에 의해서는 성장장애, 태아독성영향, 임신독성 등의 영향을 받는다 (이 등, 2002).

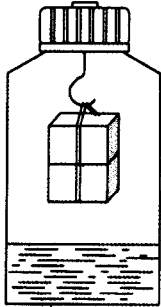


Fig. 3. WKI 플라스크 법 (Roffael, 1978).

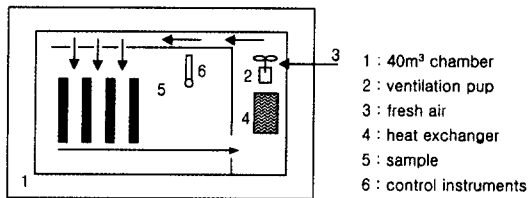


Fig. 4. Large Chamber 법.

5. Formaldehyde 방산에 관한 연구

5.1. 방산량 측정

5.1.1. 데시게이터 법 (desiccator method)

일본의 JIS와 우리나라의 KS로 규정된 24시간 데시게이터 측정 방법은 데시게이터에 시편과 증류수를 넣고 24시간 동안 포름알데히드가 포집된 증류수를 아세틸 아세톤과 아세트산 암모늄을 사용하여 적정한 후 분광 광도계를 이용하여 포름알데히드량을 검량한다 (한국표준협회, 1998).

2시간 데시게이터 측정 방법은 2시간 동안 포름알데히드를 포집하여 크로모트로프산으로 정량하는 방법으로 미국과 캐나다에서 사용한다. 포름알데히드 방산량 단위는 mg/l로 나타낸다.

5.1.2. 퍼포레이터 법 (perforator method)

주로 유럽에서 사용하는 방법으로 EN 120에 규정

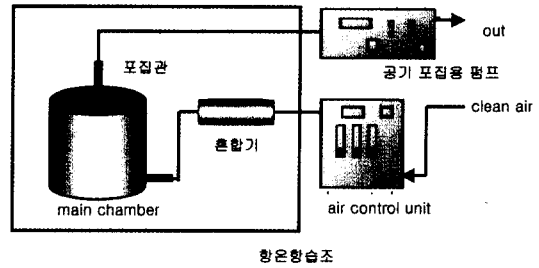


Fig. 5. Small Chamber 법.

되어 있다. Fig. 2에 있는 초자기구를 이용하여 측정한다. 약 110 g의 시편을 600 ml의 톨루엔과 함께 둥근 바닥 플라스크 안에 넣고 약 1,000 ml의 증류수를 perforator 속에 충전시킨다. 시편의 포름알데히드를 흡착한 톨루엔 기체가 perforation 동안 1분당 70~80 방울의 속도로 회수되도록 조절하여 2시간 동안 유지시킨다. 데시게이터와 같은 방법으로 포름알데히드가 포집된 증류수의 흡광도를 측정하고 검량선을 작성하여 포름알데히드의 양을 구한다. (European Committee for Standardization, 1991).

포름알데히드 방산량 단위는 보드무게당 포름알데히드 방산량인 mg/100 g으로 나타낸다.

5.1.3. GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry)를 이용한 방법

GC-MS는 시료를 Gas Chromatography로 분리하고 분리된 시료의 Mass Spectrometry를 통해 분자량을 측정하는 정성·정량 분석법이다. 최근 휘발성 유기화합물(VOC, volatile organic compound)의 분석으로 목질 판상재료 부분에서 연구가 진행되고 있다 (Santos & Galceran, 2002; Dewulf et al., 2002). 앞서 언급한 데시게이터 법과 퍼포레이터 법을 통해 얻어진 포름알데히드가 포집된 증류수를 GC-MS로 분석하여 포름알데히드의 양을 구하는 방법으로 측정한다 (Hollender et al., 2002; Ciccioli et al., 2003, Kim & Kim, 2003; Lee et al., 2003).

5.1.4. WKI 플라스크법

측정 원리는 데시게이트 법과 유사하며 폴리에틸렌

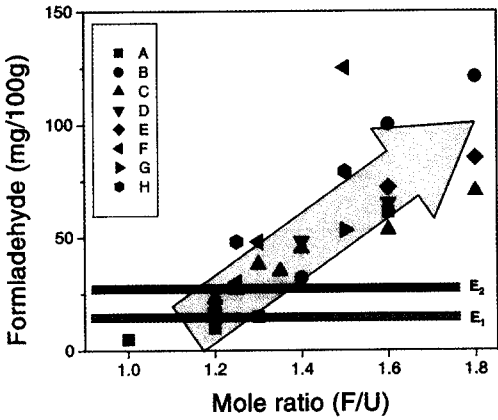


Fig. 6. Formaldehyde / Urea 몰비에 따른 formaldehyde 방산량 (I) (Myers, 1984).

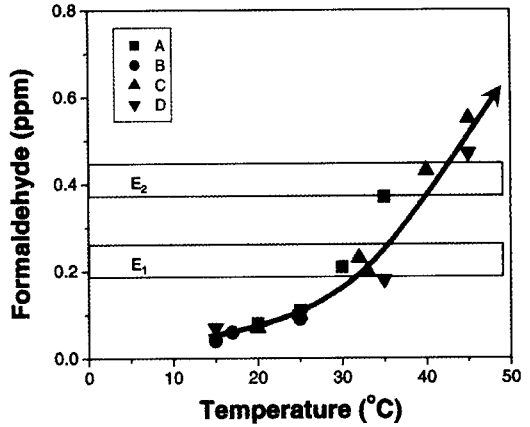


Fig. 8. 온도에 따른 formaldehyde 방산량 (Myers, 1985). (Urea-Formaldehyde 접착제를 사용한 particleboard를 large chamber법으로 측정)

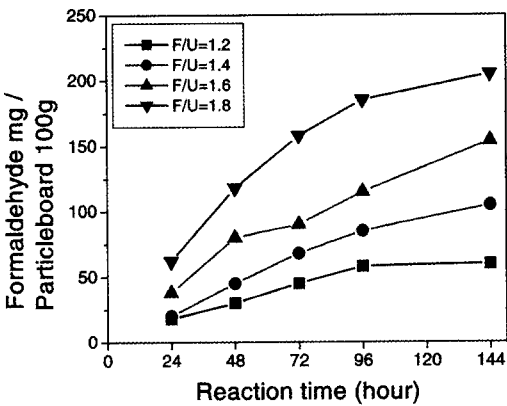


Fig. 7. Formaldehyde / Urea 몰비에 따른 formaldehyde 방산량 (II) (Roffael, 1978). (perforator 법으로 측정)

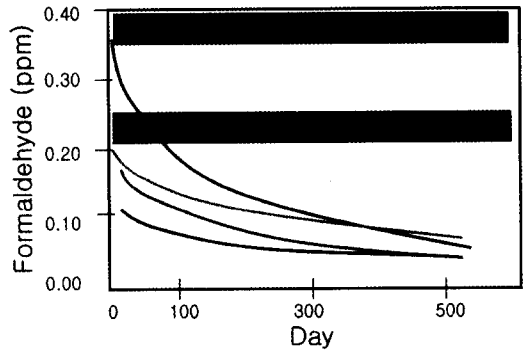


Fig. 9. 시간의 경과에 따른 formaldehyde 방산량 (Zinn et al., 1990). (Urea-Formaldehyde 접착제를 사용한 particleboard를 large chamber법으로 측정)

병안에 시편의 부피가 50 cm^3 ($2.5 \times 2.5 \times$ 두께) 가 되도록 한다. 40°C 온도에서 측정을 하며 측정시간을 변수로 한다.

포름알데히드 방산량 단위는 보드무게당 포름알데히드 방산량인 $\text{mg}/100 \text{ g}$ 으로 나타낸다.

5.1.5. Large Chamber Tests

챔버안의 공기를 순환시켜 측정하는 방법으로 1976년 독일에서 개발하여 북미에서 사용되고 있

며 ASTM E 1333에 규정되어 있다. 포름알데히드 방산량 단위는 ppm을 사용한다 (Roffael, 1978).

5.1.6 Small Chamber Tests

소챔버법은 유럽규격인 EN 717-1에 규정되어 있고 소챔버의 부피는 0.225 m^3 , 1 m^3 , 12 m^3 으로 정해져 있다. 일본에서는 2003년 7월부터 20ℓ 와 1 m^3 의 소챔버법을 표준규격으로 정하고 시행하고 있다.

Table 6. 포름알데히드 방산량에 따른 PB의 구분

	데시게이터 법 (mg/l)	포퍼레이터 법 (mg/100g)	Large chamber 법 (ppm)	Small chamber 법 (mg/m ² · h)
E ₀	0.5 이하	0.6-0.8 이하	-	0.005 이하
E ₁	1.5 이하	6.5-7.3 이하	0.16-0.25 이하	0.005-0.02 이하
E ₂	5 이하	19-21 이하	0.35-0.48 이하	0.12 이상

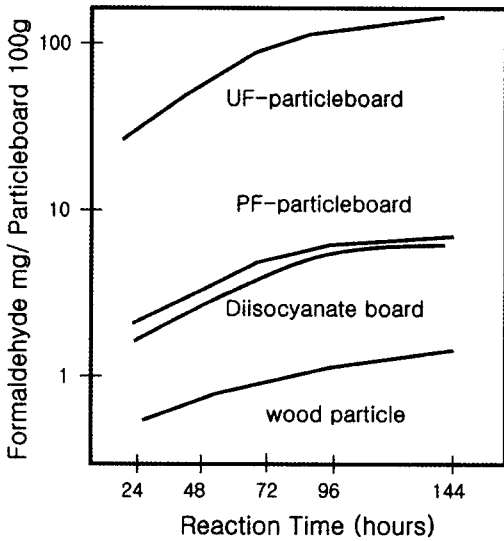


Fig. 10. 접착제 종류에 따른 formaldehyde 방산량 (WKI법) (Roffael, 1978).

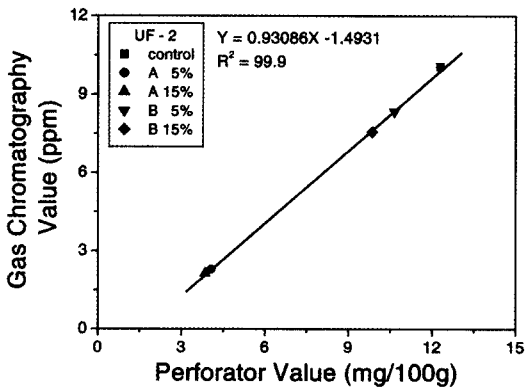


Fig. 11. 포퍼레이터 법과 가스크로마토그래피로 측정된 파티클보드내 포름알데히드 함량의 상관관계 (이 등, 2003).

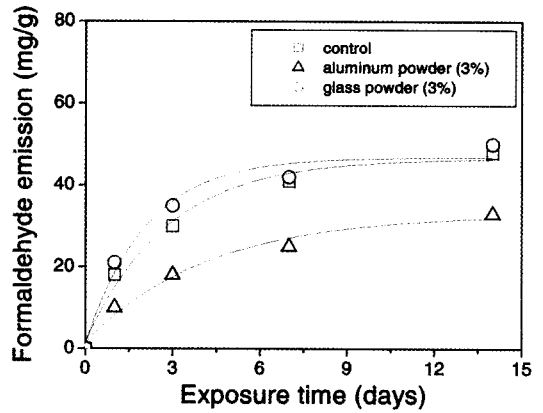


Fig. 12. Glass powder, aluminum powder를 사용한 formaldehyd 저감 연구 (Myers, 1990).

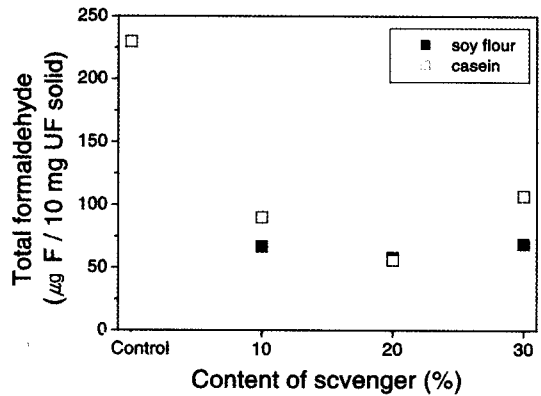


Fig. 13. Soy 와 casein을 이용한 formaldehyde 방산 저감 연구 (Lorenz et al., 1999).

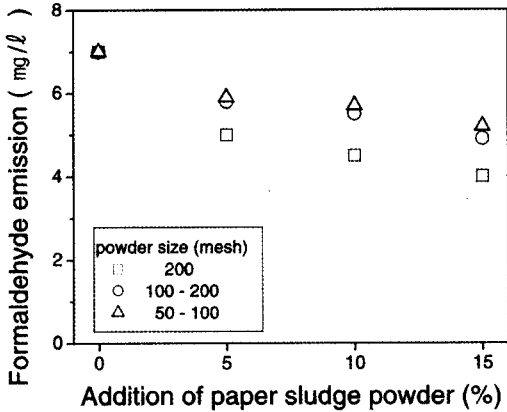


Fig. 14. Paper sludge를 사용한 formaldehyde 방산량 저감연구 (김, 1994).

Main chamber 속에 측정대상이 되는 sample를 넣은 후 주어진 조건에 따라 방산되는 formaldehyde를 중간 단계를 거치며 얇고 포집관을 통하여 GC-MS를 이용하여 측정하거나 HPLC를 이용하여 포름알데히드 방산량을 측정한다. 포름알데히드 방산량 단위는 보드 면적과 시간에 따른 방산량을 $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 로 나타낸다.

5.2. 주요 인자에 따른 포름알데히드 방산에 관한 연구

요소-포름알데히드 접착제를 사용한 목질복합재료에서 포름알데히드의 주요 방산 인자는 요소 / 포름알데히드 접착제의 몰비와 주어진 조건인 온도, 시간, 상대습도 등이 주요 방산인자에 해당한다.

지금까지의 연구결과에 의하면 요소 / 포름알데히드 접착제의 몰비가 높을수록 포름알데히드의 방산량은 증가하며, 측정온도가 높을수록 방산량은 증가한다.

또한 시간의 경과에 따른 포름알데히드의 방산량은 감소하지만 완전히 방산량이 없어지는 것은 아니다.

5.3. Scavenger를 이용한 formaldehyde 방산량 저감 연구

포름알데히드 방산량을 줄이기 위한 연구는 주로 요소-포름알데히드의 몰비조절과 접착제 합성법, 그

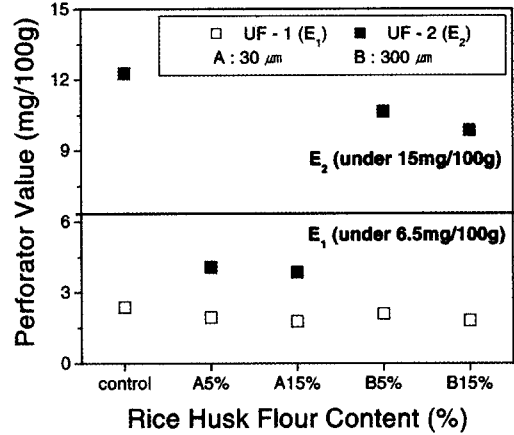


Fig. 15. 왕겨분말을 사용한 formaldehyde 방산 저감 연구 (Lee et al., 2003).

리고 요소-멜라민-포름알데히드 공축합수지의 제조 등과 같이 접착제에 관한 연구와 목질복합재 재조시 포름알데히드 포집체인 scavenger를 이용한 포름알데히드 방산량 저감연구가 진행되어 왔다. 이때 사용되는 scavenger로는 무기물질인 glass powder, aluminum power, 종이제작시 발생하는 sludge와 농업 부산물인 왕겨분말, 콩분말 등이 사용되기도 하였다.

5.4. 대체접착제 연구

5.4.1. 탄닌접착제

대체물질의 근원으로서 목재 자원으로부터 추출한 리그닌, 탄닌 그리고 CNSL (cashew nut shell liquid)과 같은 페놀성 물질에 관심을 갖게 되었다. 폴리플라보노이드인 탄닌의 응용은 경제적인 측면에서 뿐만 아니라 C-C interflavonoid 결합의 안정성, 물에 대한 높은 용해도, 알데히드와의 높은 반응성 등 때문에 외국에서 이미 연구가 시작되었고 접착제 수지에서 phenolic 물질을 위한 가능성 있는 대체물질로서 각광을 받게 되었다. 이러한 탄닌의 활용은 지금까지 주로 파티클보드 (particleboard), 합판 (plywood), 중밀도 섬유판 (Medium Density Fiberboard) 그리고 외장용 핑거조인트 (finger jointing exterior grade) 등과 같은 목재용 접착제로 성공적으로 사용

Table 7. 포름알데히드 방산량을 줄이기 위한 방법

대 상	방 법	구체적인 예	문제점	효과
접 착 제	수지제조시 물비의 저감	요소의 2차 첨가 합성	강도부족	중
	디메틸렌에테르 결합의 저감	선택적인 메틸올화 법	다단합성법	대
	유리포름알데히드 저감	포착제의 첨가	경화부족	소
피 착 제	접착제의 중화	중화제, 중성경화제	처리부족	소
	물리적 처리	함수율의 저감	처리쉬움	대
	화학적 전처리	포착제 함침	처리곤란	대
후 처 리	에이징	고환기율, 열처리	처리간편	대
	화학적 처리	암모니아, SO2	고비용	대
	물리적 처리	도장, 오버레이	고비용	대
사 용 환 경	환기, 수분, 온도	고환기, 저습도, 저온	간편	대

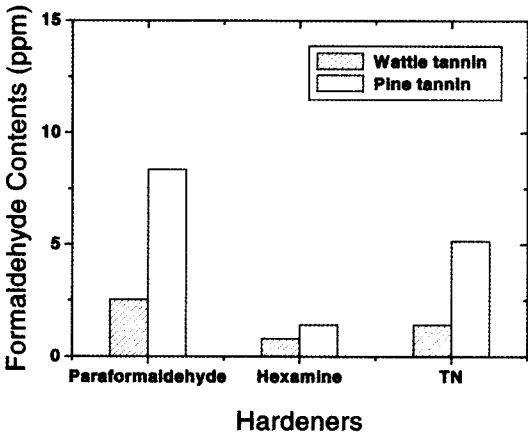


Fig. 16. 경화제의 종류에 따른 Tannin 접착제의 formaldehyde량 연구 (Kim & Kim, 2002). TN(tris(hydroxymethyl) nitromethane)

되고 있다. 특히, 내수성이 떨어지는 PF (phenol-formaldehyde) resin 이나 UF (urea-formaldehyde) resin에 비해 구두나 가죽의 무두질에 사용되어진 탄닌은 내수성이 우수하며, 포름알데히드와의 빠른 반응성으로 인해 UF resin에 비해 포름알데히드 방산이 현저히 적은 환경친화형 접착제로 각광 받고 있다 (Kim & Kim, 2002).

6. 휘발성유기화합물 (VOCs)

휘발성유기화합물의 측정방법에는 시료의 포집과 동시에 분석을 할 수 있는 On-line방법과 EPA의 TO-14에서 일반 환경 대기 중 휘발성 유기화합물의 측정 및 분석방법으로 사용되고 있는 Canister나 일정한 용기를 이용하는 용기포집법, EPA TO-17에 명시되어 있는 방법으로 흡착튜브를 이용하여 VOCs를 측정하는 고체흡착법과 용매추출법 등으로 구분할 수 있다. 이러한 측정방법들은 각각 몇가지 장·단점이 있으며, 측정하고자 하는 대상물질과 분석대상물의 성상 등에 따라 측정방법이 결정되기도 한다. 용기나 고체흡착에 의하여 VOCs를 포집한 후 GC-MS로 분석한다 (이 등, 2002; 김 등, 1999; 한국공기청정협회, 2000). 용기포집법과 고체흡착법에 대한 장·단점은 Table 8에 나타냈다.

Table 9은 미국 EPA Method TO-14에서 규정한 독성 VOCs들과 각각의 특성이다 (이 등, 2002).

6.1. 목질복합재에서 방산되는 TVOCs

최근의 연구경향은 목질복합재에서 방산되는 포름알데히드에 대한 연구과 함께 실내공기오염이라는 큰

Table 8. 용기포집법과 고체흡착법의 장·단점

측정방법	용기포집법	고체흡착법
장 점	시료 파괴 없음 열탈착 불필요 반복분석 가능 Artifact 형성되지 않음	측정 용이 경제적 수분에 대한 영향 적음 극성물질과 비극성물질 포집 가능
단 점	분석 비용 큼 시료 오염 비극성물질에만 가능 Sample volume에 한계 수분에 대한 영향	시료파괴가 야기 Artifact 형성 분석의 기회가 제한 C ₂ 이하의 저분자물질 포집에 부적합

Table 9. 미국 EPA Method TO-14에서 규정한 독성 VOCs들과 특성

Compound	Molecular Formular	Molecular weight(g)	Boiling point(°C)
Dichlorodifluoromethane	Cl ₂ CF ₂	120.91	-29.8
Methyl chloride	CH ₃ Cl	50.49	-24.2
1,2-Dichlorotetrafluoroethane	ClCF ₂ CF ₂ Cl	170.92	3.8
Vinyl chloride	H ₂ C=CHCl	62.50	-13.9
Bromomethane	H ₃ Br	94.94	4.0
Ethyl chloride	C ₂ H ₅ Cl	64.52	12.3
Trichlorofluoromethane	CFCl ₃	137.37	23.7
1,1-Dichloroethene	H ₂ C=CCl ₂	96.94	30.0~32.0
Methylene chloride	CH ₂ Cl ₂	84.93	39.8~40.0
1,1,2-Trichlorotrifluoroethane	ClCF ₂ CCl ₂ F	187.38	47.0~48.0
1,1-Dichloroethane	Cl ₂ CHCH ₃	98.96	57.0~59.0
1,2-Dichloroethane	ClCH=CHCl	96.94	48.0~60.0
Chloroform	CHCl ₃	119.38	60.5~61.5
1,2-Dichloroethane	ClCH ₂ CH ₂ Cl	98.96	83.0
1,1,1-Trichloroethane	CH ₃ CCl ₃	133.41	74.0~76.0
Benzene	C ₆ H ₆	78.11	80.0
Carbon tetrachloride	CCl ₄	153.82	77.0
1,2-Dichloropropane	H ₃ CH(Cl)CH ₂ Cl	112.99	96.0
Trichloroethylene	ClCH=CCl ₂	131.39	86.9
cis-1,3-Dichloropropene	ClCH ₂ CH=CHCl	110.97	105.0~106.0
trans-1,3-Dichloropropene	ClCH ₂ CH=CHCl	110.97	97.0~112.0
1,1,2-Trichloroethane	ClCH ₂ CHCl ₂	133.41	110.0~115.0
Toluene	C ₆ H ₅ CH ₃	92.14	111.0
1,2-Dibromoethane	BrCH ₂ CH ₂ Br	187.87	131.0~132.0
Tetrachloroethylene	Cl ₂ C=CCl ₂	165.83	121.0
Chlorobenzene	C ₆ H ₅ Cl	112.56	132.0
Ethylbenzene	C ₆ H ₅ C ₂ H ₅	106.17	136.0
m-Xylene	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	106.17	138.0~139.0
p-Xylene	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	106.17	138.0
Styrene	C ₆ H ₅ CH=CH ₂	104.15	145.0~146.0
o-Xylene	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	106.17	143.0~145.0
1,1,2,2-Tetrachloroethane	Cl ₂ CHCHCl ₂	167.85	147.0
1,3,5-Timethylbenzene	C ₆ H ₃ (CH ₃) ₃	120.20	162.0~164.0
1,2,4-Timethylbenzene	C ₆ H ₃ (CH ₃) ₃	120.20	168.0
m-Dichlorobenzene	C ₆ H ₄ Cl ₂	147.00	172.0~173.0
p-Dichlorobenzene	C ₆ H ₄ Cl ₂	147.00	173.0
o-Dichlorobenzene	C ₆ H ₄ Cl ₂	147.00	179.0~180.0
1,2,4-Trichlorobenzene	C ₆ H ₃ Cl ₃	181.45	214.0
Hexachloro-1,3-butadiene	Cl ₂ C=CClCl=CCl ₂	260.76	210.0~220.0

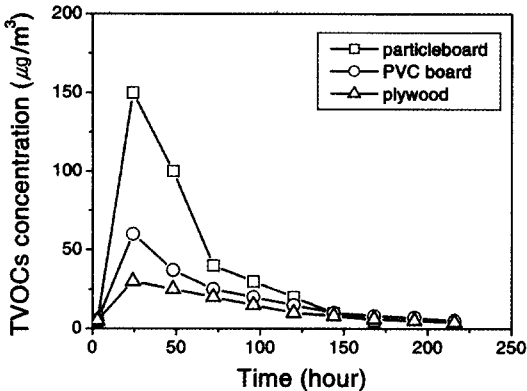


Fig. 17. 목질복합재의 TVOCs 농도와 방산율 (Guo et al., 2002).

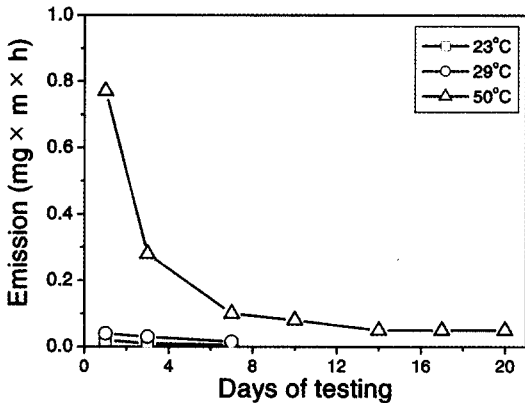


Fig. 18. 온도에 따른 laminate flooring의 VOCs의 방산량 (Wiglusz et al., 2002).

범위안에 보다 포괄적인 개념으로 VOCs 또는 TVOCs에 대한 방산량을 측정하는 연구가 증가하고 있다.

7. 제언

실내공기질은 그 대상범위가 넓으며 실외 대기오염, 오염물질의 실내발생, 건물의 침투성, 환기 (Ventilation)와 공기조화체계, 기상학적 인자와 지형학적 인자, 실외 오염원의 위치, 에너지절약 등의 인자들에 의하여 영향을 받을 수 있다. 실내공기질 관리의 최종목적은 쾌적한 실내 공기질을 유지하여 국

민건강을 증진하는데 있다고 할 수 있다.

이처럼 실내환경오염의 주요 원인 중에 하나인 목질복합재에서 방출되는 포름알데히드와 VOCs의 규제는 필요하다. 또한 국내 생산제품과 함께 수입제품에 대한 규제도 함께 병행되어야 할 것이다. 그러므로 2004년 5월에 실내공기질 관리법이 시행되기 전에 우리의 실정과 현실에 적합한 기준사항이 마련되어야 할 것이다.

실내공기질 관리방안 제시 예

- 산업체
 - 실내공기오염 저감을 위한 실내 건축자재 시공 및 사후 관리대책 마련
 - 대량생산공정에 적합한 실내공기오염 저감법 연구
- 대학
 - 실내공기오염 제어 및 측정법 연구
 - 화학재료에서 천연재료로의 대체가능성 평가
 - 최종 생산품에서 실내공기오염 물질 저감대책 연구
- 정부(연구소)
 - 실내오염피해사태 조사
 - 실내오염에 대한 교육 및 계몽활동

사 사

이 연구의 일부분은 BK21 (임산공학 연구인력 양성사업팀)과 서울대학교 농업과학공동기기센터 (NICEM) 연구진흥사업에 의해서 수행되었습니다.

인 용 문 헌

1. 김대준. 1994. 제지 슬러지의 첨가가 요소수지 파티클보드의 포름알데히드 방산 및 물리적, 기계적 성질에 미치는 영향. 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
2. 김수민, 김현중. 2002. 탄닌접착제의 화학과 응용 접착 및 계면. 3(5): 41~50.
3. 이영웅 외. 2002. 실내공간 실내공기오염 특성 및 관리

- 방법 연구. 환경부.
4. 김신도 외. 2001. 실내공간의 VOCs 특성 및 제어방안에 대한 기초조사. 환경부.
 5. 김윤신 외. 1999. 실내공기질 관리방안에 관한 연구. 환경부.
 6. 김윤신 외. 1997. 휘발성유기화합물질 규제대상 설정 및 관리방안에 관한연구. 환경부.
 7. 한국공기청정협회. 2000. 실내 VOCs 오염물질의 방출 특성 및 실태조사. 한국환경민간 단체진흥회.
 8. 한국대기보존학회. 1998. 대기환경과 휘발성유기화합물질.
 9. 한국표준협회. 1997. 파티클보드. 한국산업규격. KS F3104.
 10. 한화진. 1994. 유해대기오염물질구제에 관한 국내 대응 방안 연구. 한국환경개발연구원.
 11. 환경부. 1998. 대기환경보전법.
 12. Ciccio, P. E., M. Brancaloni, S. Frattoni, A. Marta, M. Brachetti and M. Vitullo. 2003. Relaxed eddy accumulation, a new technique for measuring emission and deposition fluxes of volatile organic compounds by capillary gas chromatography and mass spectrometry. *J. Chromatography A*. 85: 283~296.
 13. Dewulf, J., H. V. Langenhove and G. Wittmann. 2002. Analysis of volatile organic compounds using gas chromatography. *Trends in analytical chemistry* 21(9+10): 637~646.
 14. European Committee for Standardization. 1991. Perforator Method, EN 120.
 15. Guo, H. F., Murray and S.-C. Lee. 2002. Emission of total volatile organic compounds from pressed wood products in an environmental chamber. *Building and Environment* 37: 1117~1126.
 16. Hollender, J., F. Sander, M. Moller and W. Dott. 2002. Sensitive indoor air monitoring of monoterpenes using different adsorbents and thermal desorption gas chromatography with mass selective detection. *J. Chromatography A*, 962: 175-181.
 17. Kim, S. and H.-J. Kim. 2003. Curing Behaviors and Viscoelastic Properties of Wattle & Pine Tannin-based Adhesives by Dynamic Mechanical Thermal Analysis & Microscope FTIR-ATR Study. *Journal of Adhesion Science & Technology* 2003 in printing.
 18. Kim, S., Y.-K. Lee and H.-J. Kim. 2003. Evaluation of formaldehyde emission of pine & wattle tannin-based adhesives by gas chromatography. *Holz als Roh-und Werkstoff* 2003. in printing.
 19. Lee, Y.-K., S. Kim, H.-S. Yang and H.-J. Kim. 2003. Formaldehyde content of rice husk flour filled wood-particleboard bonded with urea-formaldehyde resin by perforator and gas chromatography methods. *Bioresource Technology* 2003. in printing.
 20. Lorenz, L.F., A. H. Conner and A. W. Christiansen. 1999. The effect of soy protein additions on the reactivity and formaldehyde emission of urea-formaldehyde adhesive resins. *Forest Products Journal* 49(3): 73~78.
 21. Myers, G. E. 1990. Formaldehyde liberation and cure behavior of urea-formaldehyde resins. *Holzforschung* 44(2): 117~126.
 22. Myers, G. E. 1985. The effects of temperature and humidity on formaldehyde emission from UF-bonded boards. *Forest Products Journal*. 35(9): 20~31.
 23. Myers, G. E. 1984. How mole ratio of UF resin affects formaldehyde emission and other properties *Forest Products Journal* 34(5): 35~41.
 24. Pizzi A. 1989. *Wood adhesives chemistry and technology* Volume 2, MARCEL EKKER INC, New York. pp. 343.
 25. Roffael, E. 1978. Progress in the elimination of formaldehyde liberation from particleboards *Proc. 12th Washington State Univ. Int. Symp. On particleboard*, Pullman, Wash. pp. 233.
 26. Santos, F. J., M. T. Galceran. 2002. The application of gas chromatography to environmental analysis. *Trends in analytical chemistry* 21(9+10): 672~685.
 27. Wolkoff, P. and G. D. Nielsen. 2001. Organic compounds in indoor air-their relevance for perceived indoor air quality. *Atmospheric Environment* 35: 4407~4417.
 28. Wiglusz, R., E. Stitko, G. Nickel, I. Jarnuszkiewicz and B. LgIelska. 2002. The effect of temperature on the emission of formaldehyde and volatile organic compounds (VOCs) from laminate flooring-case study. *Building and Environment* 37: 41~44.
 29. Zinn, T. W., D. Cline and W. F. Lehmann. 1990. Long-term study of formaldehyde emission decay from particleboard. *Forest Products Journal* 40(6): 15~28.