

<총설>

## FLEC(Field and Laboratory Emission Cell)법의 소개 및 적용사례

김진아 · 김수민 · 김현중\*

서울대학교 환경재료과학전공 바이오복합재료 및 접착과학 연구실

### **The Introduction and Application of FLEC(Field and Laboratory Emission Cell) Method**

Jin-A Kim · Sumin Kim · Hyun-Joong Kim \*

*Lab. of Adhesion & Bio-Composites, Program in Environmental Materials Science Seoul National University*

---

\* Corresponding author. Tel : 02-880-4794, E-mail : hjokim@snu.ac.kr

## 1. 서론

현대사회는 산업의 발전과 함께 에너지 효율성이 강조되면서 건물의 기밀성을 유지하기 위한 각종 화학물질로 만들어진 건축내외장재의 사용과 더불어 환기 부족으로 인해 실내 공기 오염이 심각해져 현대인이 관심을 갖게 되었다. 또한 현대인들은 하루 중 90% 이상을 실내에서 생활하고 있으며, 실내에서 발생하는 오염물질은 인체에 많은 영향을 미치고 있어, 실내오염 물질에 의한 피해 정도는 실외 오염도의 2~5배, 심한 경우는 100배에 달한다.(이영규 외, 2003 : Kim, S *et al*, 2005)

건축자재에서 발생하는 오염물질의 종류는 VOCs와 formaldehyde를 포함하여 매우 다양하며, 이들의 방산특성과 방산농도는 여러 요인에 의해 결정된다. 이러한 실내공기오염원을 제어하는 방법은 크게 희석제어(Dilution Control), 제거제어(Removal Control) 그리고 발생제어(Source Control)로 나눌 수 있다. 자세히 설명하면, 희석 제어는 자연환기, 기계 환기 등 적절한 환기계획을 통해 실내 오염공기를 배출하고 실외 청정공기를 실내로 공급하여 오염물질의 농도를 낮추는 방법, 제거 제어는 공기청정기 등 별도의 기계장치나 광촉매기술 등의 화학반응을 이용하여 이미 방산된 오염물질을 제거하는 방법이고 마지막으로 발생제어는 처음부터 오염물질의 방산이 적은 건축 재료를 이용하는 방법이다.

이러한 방법들 중에서 가장 효율적인 방법 다시 말해 환경에 영향을 최소화할 수 있는 방법은 발생제어 방법이다. 추가적으로 환기설비나 공기청정기 등의 설치가 필요한 희석 제어와 제거제어법은 에너지 절약 차원에서 적합하지 않으며 경제적으로도 추가 비용이 발생함을 의미하고 더 나아가

크게는 환경에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 있으므로 효과적인 방법이 아니다. 따라서 실내공기를 제어하는 방법으로 가장 우선시해야 할 것은 오염물질 저방산 자재의 사용으로, 이를 위해서는 오염물질의 방산이 적거나 없는 친환경 건축자재의 개발이 선행되어야 할 과제이다.

### 1.1 건축자재에서 방산되는 오염물질(VOCs, Formaldehyde) 방산 측정법

재료의 개발과 함께 현재 사용되는 건축자재의 오염물질 방산 거동의 현황의 파악이 이루어져야 하는데, 이를 위해서는 재료로부터 방산되는 오염물질의 정확한 측정이 중요하다. 건축자재로부터 방출되는 VOCs는 낮은 농도로 서서히 방산되기 때문에 측정방법에 따라 큰 오차를 나타낼 수 있다(환경부, 2003). 또한 이는 건축자재의 종류, 온도, 습도, 환기량 등에 많은 영향을 받는다. 각 나라별로 규정별로 다양한 측정법을 이용하고 있는데, Table 1은 측정법과 그에 따른 규정을 나타낸 표이다.

건축자재로부터 방산되는 화학물질을 측정하는 방법은 크게 Perforator법, Desiccator법, Chamber법 등으로 구분할 수 있다. Perforator법은 유럽에서 주로 사용된 방법으로, formaldehyde가 물에는 용해되며 톨루엔은 물에 용해되지 않는 점을 이용한 방법이다(EN120, 1991). Desiccator법은 우리나라의 KS와 일본의 JIS(Japanese Industrial Standard)에서 채택하고 있는 formaldehyde의 방산농도를 측정하는 방법이다(KS M 1998-2, 2005 : JIS A 1460). 이 방법은 건축자재의 양면과 측면으로부터 방산되는 농도를 측정하게 되므로 일반적인 실내공간에서의 방산거동과는 차이가 있다. 따라서 최근에는 실내의 표면에서 방산되는 화학물질의

Table 1. Measurement method and standard of building materials.

Measurement Method	Standard
Perforator Method	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ EN120 : Wood based panels. Determination of formaldehyde content. Extraction method called the perforator method</li> </ul>
Desiccator Method	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ JIS A 1460 : Building boards Determination of formaldehyde emission - Desiccator method</li> <li>◦ KS M 1998-4 : Determination of the formaldehyde emission of building interior products - Part 4 : Desiccator method</li> <li>◦ ASTM D 5582-00 : Determining Formaldehyde Levels from Wood Products Using a Desiccator</li> </ul>
Large Chamber	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ ENV717-1 : Wood based panels. Wood-based panels, Determination of Formaldehyde Release, Formaldehyde emission by the chamber method</li> <li>◦ ASTM E 1333-96 : Determining Formaldehyde Concentration in Air and Emission Rates from Wood Products Using a Large Chamber</li> </ul>
Small Chamber (20L Chamber)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ ISO/CD 12460 : Wood based panels. Determination of Formaldehyde Release Formaldehyde emission by the chamber method</li> <li>◦ KS M 1998-2 : Determination of the emission rate formaldehyde and volatile organic compounds in building interior products - Part 2 : Small chamber method</li> </ul>
1 m <sup>3</sup> Chamber	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ ISO/CD 12460 : Wood based panels. Determination of Formaldehyde Release Formaldehyde emission by the chamber method</li> </ul>
Field and Laboratory Emission Cell(FLEC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ ENV 13419-2 : Building products - Determination of the emission of volatile organic compounds - Part 2. Emission test cell method</li> <li>◦ ISO16000-10 : Indoor air. Part 10. Determination of the emission of volatile organic compounds. Emission test cell method</li> <li>◦ ASTM D 7143-05: Practice for Emission Cells for the Determination of Volatile Organic Emissions from Indoor Materials/Products</li> <li>◦ KS M 1998-3 : Determination of the emission rate formaldehyde and volatile organic compounds in building interior products - Part 3 : Emission cell method</li> </ul>

양을 측정하는 방산농도시험 Chamber법이 측정방법으로 많이 사용되고 있다.

### 1.2 방산농도시험 Chamber법

미국의 ASTM과 유럽연합(ECA)에서는 Chamber

의 규격에 따라 실험 방식을 정하고 있다. Chamber는 유리나 스테인리스로 제작되며 크게 용량에 따라 구분을 하는데 1m<sup>3</sup>이상인 Large Chamber법과 1m<sup>3</sup>이하인 Small Chamber법, 그리고 설치 방법에 다른 구분으로 Large Chamber는 가구류 등을 내부에 설치하여 측정이 가능하도록 구성된 것이며, Small Chamber는 재료 표면에 설치하는 방법과 Chamber 내부에 재료를 설치하는 방법으로 구분한다. Chamber의 종류에 따른 실험 방법을 Table 2에 나타내었다(O. Jann, O. Wilke, 2001 : 환경부, 2003).

20L Small Chamber법은 일반적으로 건축자재의 샘플을 이용하여 VOCs와 formaldehyde의 방산량을 평가하는 데 이용하며, Large Chamber는 가구류의 평가에 이용하고 있다. 20L Small Chamber는 현재 우리나라의 환경부 공정시험법으로 규정되어있는 방법으로 일본의 JIS A 1910의 규정에 따른 방법을 도입한 것이다. 이 방법은 Chamber라고 불리는 스테인레스강 또는 유리로 구성된 용기를 사용해서, 시험 챔버 내의 공기농도, 통과

한 공기의 적산유량 및 시험편의 표면적을 구하여 시험대상 건축 재료의 단위면적당 휘발성유기 화합물 및 formaldehyde의 방산량을 결정하는 방법이다(KS M 1998-3, 2005). 20L Small Chamber를 사용한 실험에서 얻은 데이터를 실제 스케일에 적용할 때는 스케일의 차이에 따른 오차가 생기게 된다. 따라서 실제 크기의 가구 등을 그대로 설치할 수 있는 Large Chamber에서의 측정이 고려되었다(환경부, 2003). Large Chamber는 NRC (Institute for Research in Construction, National Research Council, Canada)의 Zang 박사에 의해 개발된 Chamber로, 스테인리스 재질로 각종 환기시스템에 대응 가능하고, 흡·출구 위치가 이동 가능한 구조로 되어 있다.

현재 사용되고 있는 오염물질의 방산 측정방법의 종류 중에서 우리나라에서는 주요 측정방법으로 20L Small Chamber(환경부공정시험법)를 사용하고 있다. 하지만 20L Small Chamber는 7일이라는 분석시간이 길며 고가인 단점이 있다. 이에 본 총설을 통해 20L Small Chamber의 대안으로 유럽

Table 2. Chamber standard of ASTM(American Society for Testing and Materials) and ECA(European Collaborative Action).

Method	Chamber		Emission Cell	
	20m <sup>3</sup> Chamber	1m <sup>3</sup> Chamber	20L Small Chamber	Field and Laboratory Emission Cell (FLEC)
Standard	ASTME 1330-90 ENV 717-1	ISO/CD 12460	ISO/CD 12460 ENV 13419-1	ENV 13419-2 ASTM D 7143-05
Volume(m <sup>3</sup> )	20	1	0.02	0.000035
Temp.(°C)	23			
Humidity(%)	45 or 50			
Sample Size (m <sup>3</sup> )	20	1	0.0392	0.0177

에서 사용하고 있는 간단하고 신속한 측정법인 FLEC( Field and Laboratory Emission Cell)법의 소개하며 다양한 연구법을 언급하고자 한다.

## 2. FLEC의 개요

### 2.1 FLEC(Field and Laboratory Emission Cell)

FLEC은 소형 이동식 기기로서 건축자재, 페인트, 목재, 인쇄물 등의 표면으로부터 방산되는 휘발성유기화합물(VOCs) 및 반휘발성유기화합물(SVOCs)의 측정을 위한 기기다. 이것은 덴마크(The Danish National Institute of Occupational Health, The Danish Building Research Institute), 스웨덴(The Swedish National Testing and Research Institute) 그리고 CHEMATEC의 공동연구로 1990~1991년에 개발된 것으로, 개발 목적은 재료를 파괴하지 않고 건축현장에서의 표면방산 실험과 실험실 내에서 수행하는 방산 실험이 가능하면서, 작고 다용도의 사용하기 쉬운 도구의 개발하는 것이었다(Peder Wolkoff *et al.*, 1991; Peder Wolkoff, 1996).

FLEC법은 재료의 평평한 표면에 장치하는 부분이 열린 벽 또는 면(open wall or face)이라는 점에서 20L Small Chamber법과 다르며, 이런 면에서 재료의 표면은 효과적으로 FLEC의 한 부분이 된다. FLEC은 평평한 표면을 가진 재료나 생산품 그리고 액상의 재료에 사용할 수 있다. 기본적으로 마루바닥 재료, 목질제품, 실란트, 접착제, 페인트, 코팅, 플라스틱 구슬장식, Concrete Levelling Compounds, 벽지, Plastic Sheeting, Structural Foams에 적용이 가능하다. FLEC의 셀은 딱딱한 생산품의 표면에 직접 장치되며 봉합된 틈막이 또는 O

자형 링에 셀 그 자체로 눌러지는 무게로 표면에 장치된다. FLEC에 주입된 공기는 시험재료의 전체표면을 지나 오염물질을 포함한 공기는 좌우로 포집되고 중앙의 관을 통해 배출되도록 설계되었다.

### 2.2 FLEC의 구조 및 특징

FLEC은 원 모양의 광택이 있고 산에 강한 스테인리스 스틸로 만들어졌다. 이 스테인리스 스틸은 20L Small Chamber의 재질인 전자 연마된 스테인리스 스틸보다 더 균일하게 손으로 연마된 것으로 오염물질의 흡착을 적게 한다. 또한 모든 튜브와 연결 부분도 양질의 스테인리스 스틸로 되어 있다. FLEC의 구조와 단면은 Fig. 1에 나타냈는데, 지름 15cm의 원으로, 최대표면적과 부피는 각각 0.0177m<sup>2</sup>, 0035 L이다. 재료 위에 FLEC을 놓으면, 재료의 표면은 FLEC의 바닥이 된다. 시료 부하율(재료의 면적/FELC의 부피)은 최대 506 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>이다. FLEC과 실험 재료 경계면의 연결부위는 이물질이 방산 되지 않는 실리콘 고무로 처리했다(R. Meininghaus, E. Uhde, 2002 : A. Afshari *et al.*, 2003).

특수 제작된 고순도 공기는 FLEC의 원형 둘레에 있는 관을 통해 FLEC 내부로 들어가 재료 표면에 흐르게 된다. FLEC의 공기 주입(Air inlet)은 공기가 중앙의 배출구를 통하여 나가기 전에 공기의 흐름이 시험재료의 전체표면을 지나도록 설계되었다.

기존에 사용하고 있는 대형챔버(Large Test Chamber)나 현재 우리나라의 주요 방산측정방법인 20L Small Chamber법(Small Test Chamber)은 고가의 설치비용과 상대적으로 긴 측정기간 때문에 대부분의 산업체 연구실에서 반복적인 방산에 관한 품질 제어를 하기에는 한계가 있다. 다시 말해 이

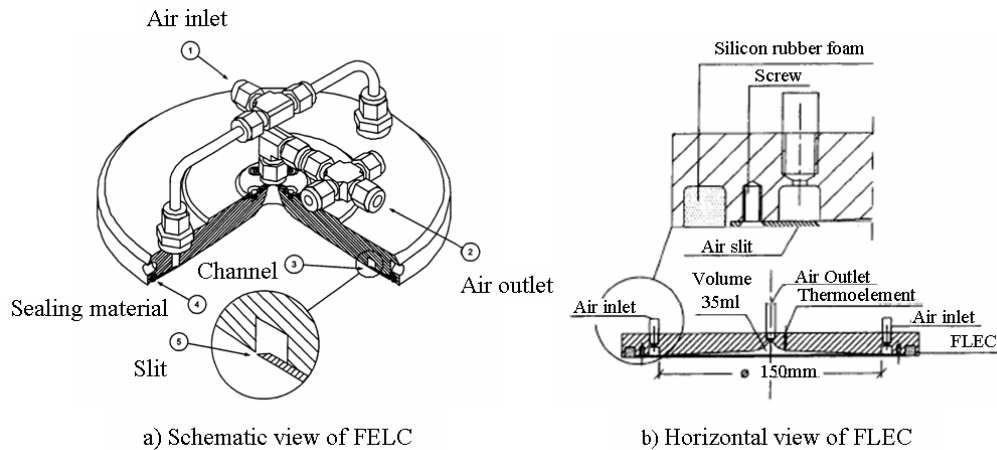


Fig. 1. Schematic view of emission cell of FLEC.

들 측정 방법은 연구실이나 생산현장 또는 시공현장에서 실험의 빠른 회전시간(피드백)을 충분하게 제공할 수 없고, 측정에 따른 실험 결과는 생산현장에 제공하여 빠르게 대처하는 데 어려움이 있다. 따라서 연구실이나 생산·시공 현장에서 간단하면서 짧은 시간이 소요되는 측정법을 이용할 경우 보다 신속하게 문제를 해결할 수 있다(T. Salthammer, 2004).

이러한 요구에 최적인 FLEC법은 재료 자체를 파괴하지 않으면서 연구실에서의 실험은 기본으로, 생산현장과 시공현장에 이용됨으로써 재료에 대한 정보를 신속하게 수집할 수 있다. 다시 말해, 생산현장에서의 테스트를 통해 문제점을 즉시 파악하여 신속하게 대처하도록 하며, 시공 후에 의심스러운 건축자재의 표면에서 나오는 방산물질 및 그 양을 파악하여 재료의 실제 적용시의 데이터를 확보하여 생산자에게 정보를 제공할 수 있다.

그러므로 FLEC과 같은 좀 더 간단한 측정 방법 즉, 산업체들이 여러 부문에서 품질보장과 의미 있는 방산 시험을 수행할 수 있는 방법이 이상적

이다. 현재 우리나라에서도 20L Small Chamber를 대체할 수 있는 보다 간단한 측정방법인 FLEC법에 관심을 갖고 보유하고 있는 곳은 대학원 연구실, 국공립연구소, 건설회사의 연구소 등 여러 기관이 있다.

### 3. FLEC을 이용한 측정 방법

FLEC을 이용한 측정 실험의 가장 큰 특징은 간단하면서 단시간에 가능하다는 것인데, FLEC의 실험 과정에 대한 이해를 돕기 위해 현재 우리나라의 건축자재에서 방산되는 오염물질측정법의 공정시험법인 20L Small Chamber법과 비교하면서 설명하도록 하겠다. Table 3은 환경부공정시험법을 기준으로 20L Small Chamber법과 FLEC법의 실험 조건을 정리한 것이다.

#### 3.1 세척 및 실험재료 준비

20L Small Chamber와 달리 FLEC의 세척은 간

Table 3. The test condition of FLEC and 20L Small Chamber.

Test Condition	FLEC	20L Small Chamber (환경부공정시험법 기준)
Sample Area	0.0177m <sup>2</sup>	0.0392m <sup>2</sup>
Volume	0.035L	20L
Loading Factor (Area of sample/Volume, m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	505.71m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	1.96m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Air Change Rate(h-1)	428.57/h	0.5±0.05/h
Air Supply(l/min)	250ml/min	167ml/min
Equilibration Time	sampling after 15-30 minutes	sampling after 7days
Temperature · Humidity	23±2.0℃ · 50±5 %	25±1.0℃ · 50±5 %
Compounds, Sampling Flow and Total Sampling	VOC : 50ml/min, 1.5L Formaldehyde : 150ml/min, 4.5L	VOC : 167ml/min, 3.2L Formaldehyde : 167ml/min, 10L
Inlet Air	High purity air	Room air
Background Concentration	VOC : 2 μg/m <sup>3</sup> TVOC : 20 μg/m <sup>3</sup>	VOC : 2 μg/m <sup>3</sup> TVOC : 10 μg/m <sup>3</sup>
Cleaning Process	Vacuum oven orcleaning by methylene then high purity air for 1day	Cleaning by pure water then oven for above 15minutes in 260℃
Analysis Method	VOC : GC/MS Formaldehyde : HPLC	VOC : GC/MS Formaldehyde : HPLC

단하면서 단시간에 가능한데, 세척법은 용매세척과 열 세정으로 나눌 수 있다. 열 세정은 20L Small Chamber와 마찬가지로 오븐에서 가열하여 잔존하는 화학물질을 휘발시키는데 이때 재질의 변색을 막기 위해 진공오븐을 사용한다. 그리고 용매세척은 GC/MS에서 검출되지 않은 Methylene으로 세척 후 배경 공기로 사용하는 고순도 공기를 1일 정도만 흘려주면 FLEC 내부에서는 일정한 기류가 형성되는 구조로 되어있기 때문에 충분한 세척이 가능하다.

FLEC의 실험 재료 준비는 FLEC 내부 면적인 15×15cm이상의 크기로 잘라서 측정 전까지 은박지로 쌓아 밀봉하여 보관한다. FLEC의 경우도 액상재료는 정해진 시료 부하율로 결정한 양을 유리관 위에 도포하여 측정한다.

### 3.2 공기 유입과 온·습도 조절

FLEC의 emission cell 내부로의 공기유입과 온·습도 조절을 Fig. 2로 나타내었다.

Fig. 2에서 (1)의 특수한 고순도 공기가 공기공

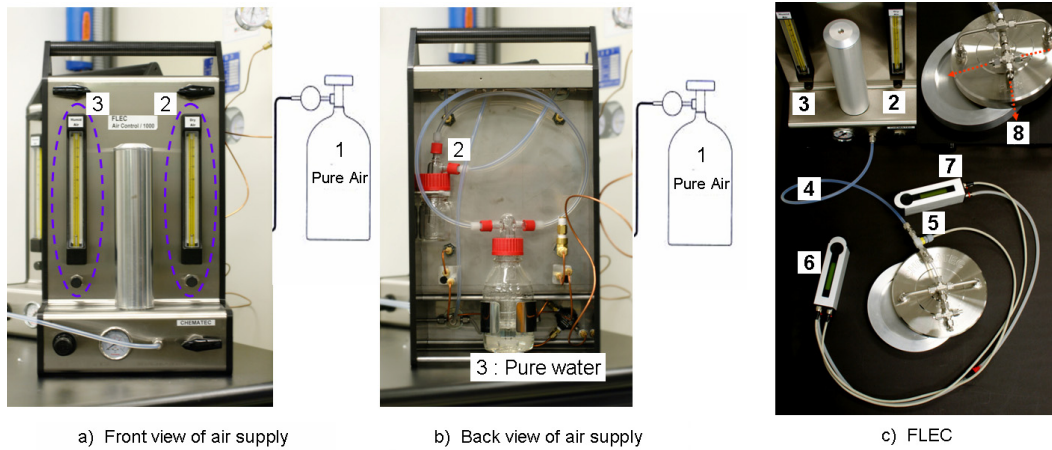


Fig. 2. Air supply and sampling pump of FLEC.

급기의 후면 (2)를 지나 Dry Air로, (3)의 초순수를 지나면서 Humid Air로 나뉘어져 들어간다. 이렇게 유입된 공기는 전면에 있는 (2), (3)의 Flowmeter에 의해 유량 250 ml/min, 습도 50%로 조절되어 (4)의 Teflon관을 통해 FLEC Cell의 내부로 들어간다. 온·습도가 제대로 유지되고 있는지는 (5)의 센서를 통해서 (6)의 Pump에 실시간으로 온·습도가 나타나므로 즉시 (2), (3)으로 습도조절이 가능하다. 들어간 공기는 FLEC의 원형돌레에 있는 관을 통해 Fig. 3처럼 내부로 확산되어 재료 위를 흐르게 된다.

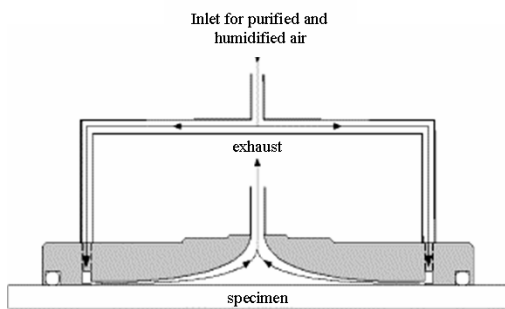


Fig. 3. A schematic showing the flow geometry of the FLEC.

### 3.3 VOCs 및 formaldehyde 포집과 분석

휘발성유기화합물(VOC)은 Tenax-TA로 포집, formaldehyde는 DNPH-cartridge를 이용하는데, 오존제거를 위해 카트리지 앞에 오존 스크리버를 장착하여 포집한다. 실험 재료를 emission cell에 세팅하기 전에 온습도가 안정된 것을 확인한 후, 시료 포집관을 사용하여 유리판 위에서의 배경농도를 측정한다. 배경농도의 측정 후 20L Small Chamber 법은 재료를 세팅하고 7일이 경과하고 포집을 하는데 반해, FLEC은 재료를 FLEC 아래에 놓은 뒤 10~30분의 안정화 즉 재료 위에 고순도 공기를 흘려주는 작업을 한 후 포집을 하게 된다. 이처럼 단시간에 안정화가 이루어지는 이유는 배경 공기로 특수 제작된 고순도 공기를 이용하고 FLEC은 상대적으로 적은 부피로 인한 높은 환기횟수를 가지므로 공기순환이 20L Small Chamber에 비해 잘 이루어지는 점, 그리고 FLEC 내부의 구조적인 특징상 난기류가 거의 없으며 일정한 기류를 형성하므로 짧은 시간에도 충분히 공기 순환이 가능하다는 것이다.



FLEC법은 Fig. 2 (6), (7)의 VOCs와 formaldehyde pump를 이용하여 각각 50 ml/min, 150 ml/min으로 30분 동안 1.5 L, 4.5 L를 포집한다. 총 주입되는 공기의 양이 250 ml/min이므로 남은 50 ml/min은 air outlet을 통해 외부로 배출된다. 포집을 마친 튜브들은 은박지로 감은 후 지퍼 백에 밀봉하여 분석 전까지 4°C 이하로 냉장 보관하여 분석 시에 개봉하여 VOCs는 GC/MS로, formaldehyde는 HPLC로 분석한다.

#### 4. FLEC의 영향 인자

오염물질의 방산 농도는 일반적으로 재료 표면에서의 오염물질 증발이나 오염물질의 확산 또는 이 둘의 복합적인 작용에 따라 그 값이 달라진다. 이런 오염 물질 방산과정은 공기가 유입되는 속도에 대해 의존성이 있으며, 측정시의 온·습도의 영향도 받는다.

기존에 FLEC으로 유입되는 공기의 속도와 온·

습도가 동일한 재료에서의 방산에 미치는 영향에 대해 연구되었다. FLEC의 부피와 노출되는 재료 표면적은 고정되어 있는 값이므로 유입되는 공기의 속도가 달라지는 것은 FLEC에 들어가는 공기의 유량이 달라지며, 시간당 순환되는 공기의 환기횟수도 달라지는 것을 의미한다. 방산에 대한 온·습도 대한 영향은 Bake out의 효과를 보면 충분히 예상가능하다.

FLEC을 개발한 Wolkoff박사는 1993년과 1998년에 다양한 건축 재료에 대한 유입 공기의 속도와 온습도의 영향에 대해 연구하였다.

##### 4.1 유입 공기의 속도

FLEC을 개발에 동참한 Peder Wolkoff박사는 1993년과 1998년에 다양한 건축 재료에 대한 유입 공기의 속도를 변화시키면서 연구하였다.

FLEC의 부피는 일정하기 때문에 유입되는 공기 속도의 변화는 환기횟수의 변화 그리고 공기의 유동률 (Air Flow Rate)의 변화를 의미한다. 예를 들어 FLEC으로 유입되는 공기의 속도가 빠르면

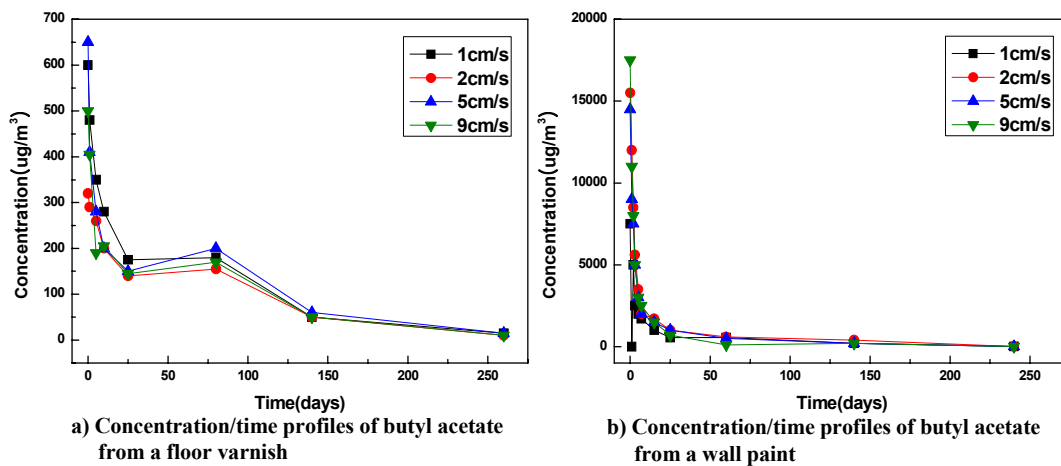


Fig. 4. Concentration/time profiles of butyl acetate from a floor varnish and 1,2-propanediol from a wall paint at 4 different air velocities at 23°C and 50% RH.

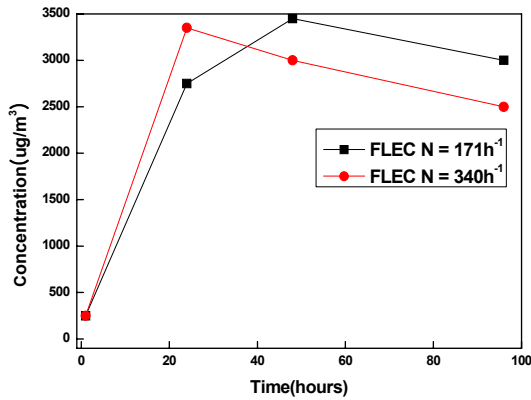


Fig. 5. Concentration/time profiles of 2 ethylhexanol from carpet at two air exchange rates, respectively.

단위 시간 당 환기횟수가 크며 단위 분 당 공기의 흐름 역시 많다는 것을 의미한다.

유입 공기의 속도를 1cm/s, 2cm/s, 5cm/s, 9cm/s로 변화시켰는데, 각각의 공기 속도에 해당하는 공기 유동율은 300 ml/min, 600 ml/min, 1400 ml/min, 2800 ml/min이다. Floor Vanish와 Wall paint에서 방산되는 물질 중 Butyl Acetate와 1,2-propandiol의

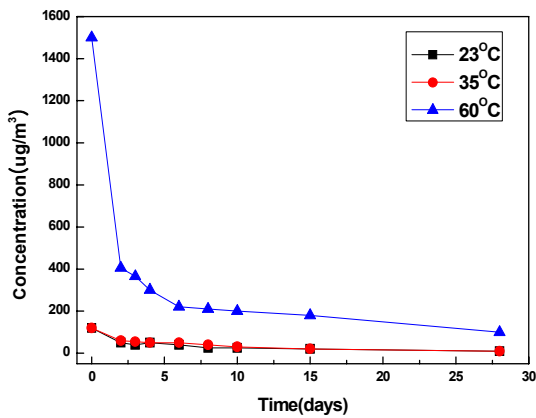
시간에 따른 농도 변화를 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 두 가지 액상재료에서는 공기의 유입속도의 영향은 뚜렷한 차이를 확인할 수 없었으나, Fig. 5는 액상 재료와는 다른 결과를 보이는 카펫에서의 결과를 나타내고 있다.

카펫에서는 변수를 환기횟수로 하여 각각 171회/h, 340회/h로 설정했으며, 이에 해당하는 공기의 속도는 0.35cm/s, 0.7cm/s이다. 카펫에서의 2-Ethylhexanol은 측정 초기 24시간 동안에는 공기 유입 속도가 높은 실험 군에서 높은 농도로 방산되고, 측정 후 약 40시간이 지난 시점부터는 공기 속도가 낮은 실험 군에서 높은 농도를 나타내었다.

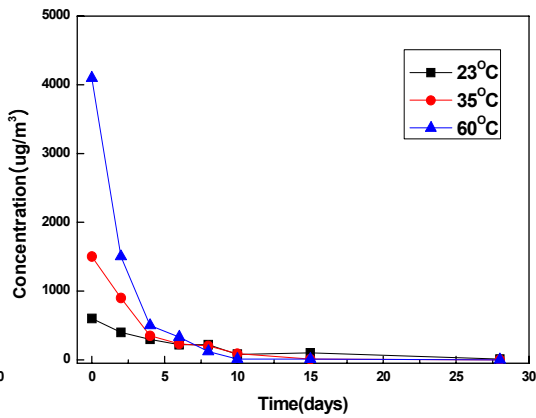
## 4.2 온·습도

### 4.2.1 온도 변화

온도변화에 따른 휘발성 유기화합물에서 방산 거동은 대부분 23°C에 비해 50°C에서 미미한 영향을 나타낸 반면, 60°C에서는 큰 변화를 보이고 있다.



a) Concentration/time profiles of phenol from PVC



b) Concentration/time profiles of butyl acetate from a floor varnish

Fig. 6. Concentration/time profiles of phenol from PVC and butyl acetate from a floor varnish at 3 different temperatures and 50% RH at air velocity = 5cm/s.

공기의 유입속도를 5cm/s로 고정하여 50%의 습도 조건에서 온도 23℃, 35℃, 60℃에 따른 PVC Flooring과 Floor Vanish에서의 방산 거동을 살펴 보자.

Fig. 6은 PVC Flooring에서의 따른 Phenol의 방산 농도와 Floor Vanish에서의 Butyl Acetate의 방산 농도를 각각 나타내었다.

PVC Flooring에서 Phenol의 농도는 초기 2~3주 동안은 60℃ 조건에서 높게 나타났으며, 4주 후 60℃에서의 농도는 23℃에서의 농도와 비슷했다. 1개월 후 23, 35, 60℃에서의 농도의 비는 1:1:3을 나타내었다. Floor Vanish에서 Butyl Acetate는 첫 주 동안 35, 60℃에서 높은 방산농도를 나타내었고, 그 후에는 23℃에서의 방산농도가 더 높았다.

#### 4.2.2 습도 변화

일부 휘발성 유기화합물은 습도와 온도의 영향을 크게 받지만, 방산되는 VOCs의 종류에 따라 다르다. 공기의 유입속도를 5cm/s로 고정하여 23℃의 온도 조건에서 습도 0, 50%에 따른 Wall paint에서의 방산 거동을 살펴보자.

Fig. 7은 Wall paint에서 1,2-propandiol의 방산 농도를 나타내었는데, 습도 0%일 때는 거의 제로에 가까운 농도였는데, 이에 비해 50%일 때는 실험 기간 내내 높은 값을 보였다. Taxanol의 방산 거동은 1일 이후로 변화가 없었다.

### 5. FLEC을 이용한 다양한 측정 실험

#### 5.1 보드(board)류의 측정

T. Salthammer *et al.*(2001)은 FLEC 실험에서 재료의 균일함을 가정하고 FELC의 위치를 변화하

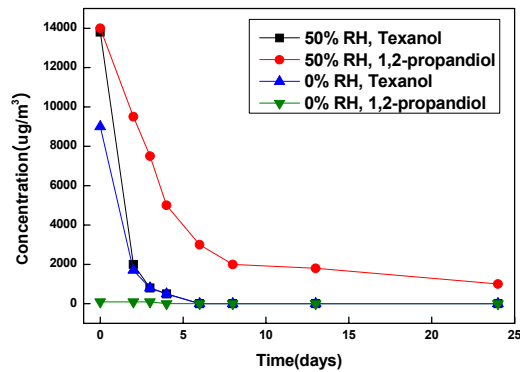


Fig. 7. Concentration/time profiles of 1,2-propandiol and texanol from a waterborne wall paint on avosum board, respectively at 0 and 50% RH, and 23℃ the air velocity = 5cm .

여 방산농도 측정, FLEC으로 석고보드를 이용한 확산실험, FLEC 2대를 이용한 실험 등 다양한 실험을 수행하였다.

FLEC 실험에서 재료 표면의 균일함이 중요한데, 재료가 매우 균일하다고 할 때 방산물에 영향을

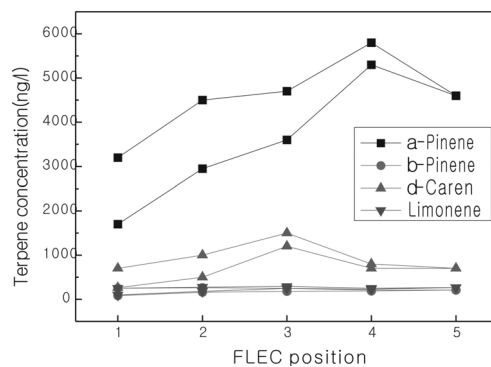
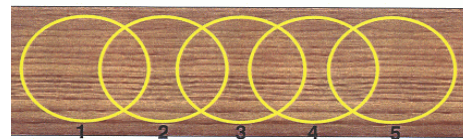


Fig. 8. Determination of monoterpene emission at five different positions on a pine-wood board.

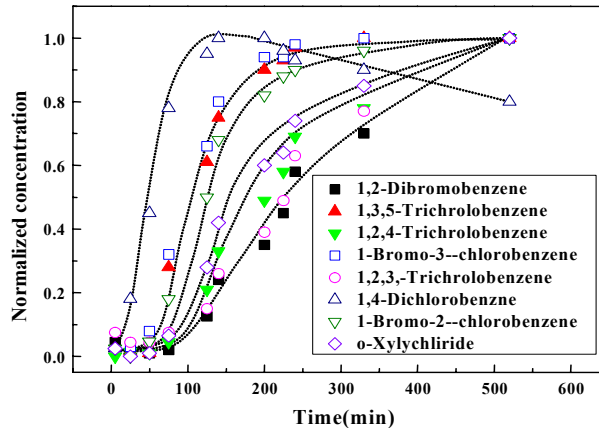
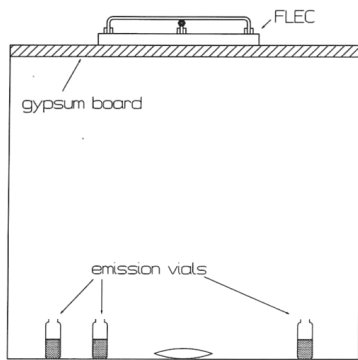


Fig. 9. One-flow system : OC concentrations in the cell(normalized) vs. time curves for gypsum board.

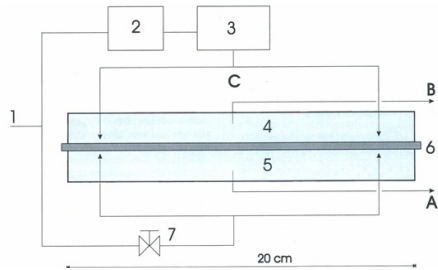


Fig. 10. Two-flow system : (1) filtered and humidified air; (2) mass flow controller; (3) VOC generator; (4) primary cell; (5) secondary cell; (6) materials; (7) needle valve; A, B, C: sampling ports.

주는 것은 FLEC의 위치이다. Fig. 8은 소나무로 된 목재 선반 보드위에 FLEC의 위치를 바꿔가며 실험한 것이다.

One-flow system : Fig. 9의 우측처럼 1ml의 바이알에 비점이 높고 낮은 휘발성 유기화합물을 각각 담아서 시간의 경과에 따른 물질의 농도를 측정하였다. 그 결과는 상대적으로 휘발성이 큰 1,4-dichlorobenzene와 1-bromo-3-chlorobenzene은 10~30분 사이에 휘발되어 석고보드를 통과하기 시작

했고 휘발성이 적은 1,2,3-trichlorobenzene과 1,2-dibromobenzene은 60~74분 후에 측정되었다.

Two-flow system : Fig. 10처럼 재료를 중앙에 놓고 FLEC 2대를 방산 셀이 마주보게 설치하여 primary FELC cell에는 toluene, ethylbenzene 등의 20가지 화합물이 포함되어 있는 공기를 유입했다. Fig. 11은 일부 오염 물질의 시간에 따른 농도를 나타낸다. 대부분의 물질들의 농도는 실험 시작 직후에 안정적인 상태에 도달하고 있는데 이는 흡착현상이 적음을 나타낸다. Primary FELC cell에서는 낮은 비율이지만 phenoxyethanol의 농도가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 오염물질이 재료에 확산되고 흡착이 일어남을 의미한다.

### 5.2 접착제와 바닥재에 미치는 알칼리(Alkali) 영향의 분석

스웨덴의 Johan Alexanderson *et al.*(2001)은 알칼리성 콘크리트가 접착제와 바닥재에 미치는 영향에 대해 FELC법을 이용하여 실험하였다. 최근 연구에서 높은 습도는 접착제와 바닥재에서 VOCs의 방산량을 증가시키는 물질의 분해를 일으키는

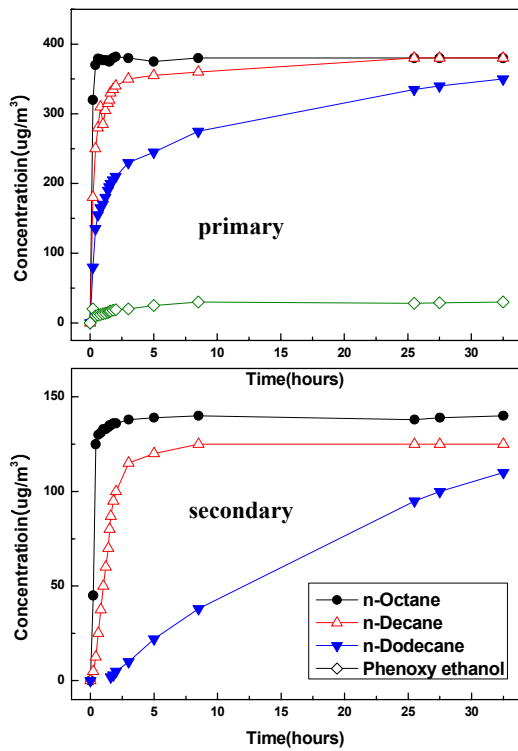


Fig. 11. Two-flow system : VOC-containings is introduced into primary cell. Air concentrations are measured at both FLEC outlet tubes and at the inlet of primary cell. The test sample is gypsum board.

것으로 알려졌다. 이러한 수분의 영향과는 별개로, 콘크리트의 알칼리성은 VOCs의 방산거동에 중요한 요인이다.

수용성 아크릴 접착제로 시공한 PVC 바닥재는 수분 자체의 영향은 없으나, 콘크리트에 존재하는 알칼리성을 띠는 수분의 영향은 크다. Fig. 12는 건조 시간에 따라 각기 다른 습도를 나타내는 콘크리트(물/시멘트 비 : w/c=0.5)에 시공한 PVC에서 방산되는 오염 물질의 농도를 나타내고 있다. 최초 측정은 실험 시작 6개월 후에 이루어졌으며, 이때 1-butanol이 측정되었는데 이는 Butyl Acetate로 이루어진 접착제가 콘크리트의 알칼리에 영향을 받았기 때문이다. 콘크리트가 80% RH로 건조되자 방산 농도는 매우 낮았다. 두 번째 측정은 2년 후에 실시했는데, PVC의 가소제가 영향을 받아 나타난 2-ethylhexanol이 방산되었다. 이 물질은 가장 건조된 콘크리트에서도 나타났다.

Fig. 12의 우측은 콘크리트 위에 calcium aluminate 시멘트인 Levelling Compound를 5 mm 두께로 발라서 기체의 영향을 나타내었다. 이 시멘트는 pH

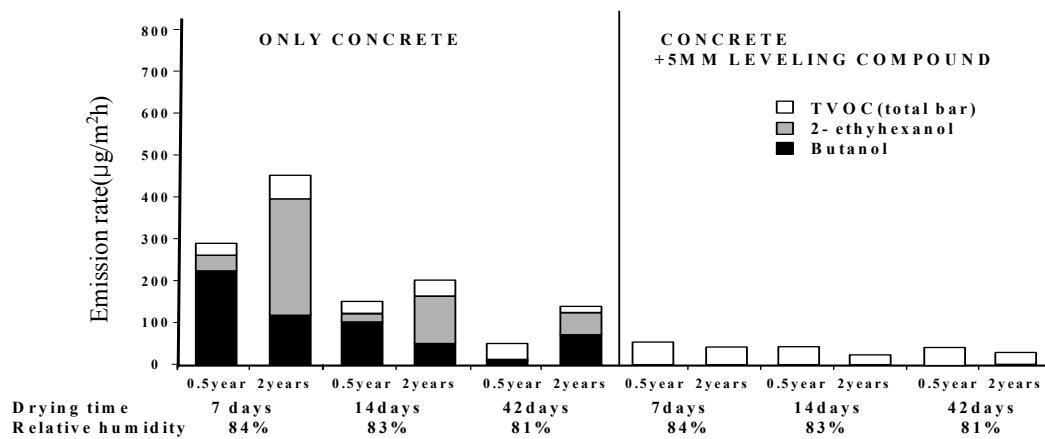


Fig. 12. Emission from PVC floorings alued on a reference concrete(w/c=0.5) without or with a labelling compound based on calcium aluminate cement.

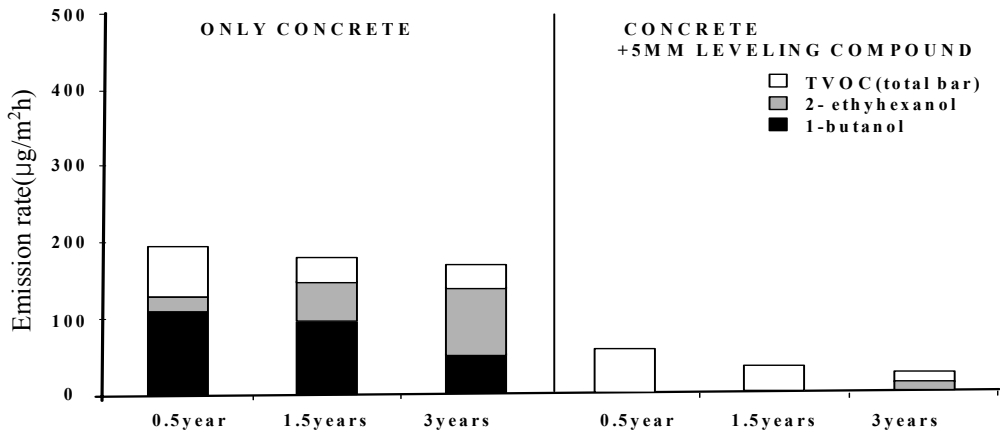


Fig. 13. Emission from PVC floorings alued on a self drvina concrete(w/c=0.35) with low humidity (RH=70%), without or with a labelling compound based on calcium aluminate cement.

11정도로 낮은 알칼리성을 띤다. 실험 결과는 Levelling Compound가 접착제와 바닥재에 미치는 콘크리트가 띄는 알칼리성의 영향을 차단하는 방어막 역할을 했음을 나타내고 있다. 이 방어막 효과는 2년이 지나도 분해 물질 방산이 나타나지 않은 것으로 보아 오랜 기간 지속될 것이다.

물/시멘트 비를 낮춤으로서 혼합 수분의 화학적 결합은 콘크리트가 빠르게 건조되게 한다. Fig. 13은 물/시멘트 비가 0.35로 짧은 시간에 건조되는 콘크리트를 이용하여 실험한 결과이다. 콘크리트 시공 후 6개월이 지난 시점에서의 상대습도가 70%임에도 불구하고, 측정 초반에는 접착제의 분해가, 시간이 흐를수록 PVC가소제의 분해가 상당히 이루어짐을 알 수 있다. 이처럼 높은 방산농도를 나타내는 원인 중 하나는 낮은 물/시멘트 비가 접착제에서 나오는 수분이 영향을 미칠 수 없는 높은 밀도의 콘크리트를 만들기 때문이며, 또 다른 이유는 높은 시멘트의 함유량 때문이다. 이 실험에서도 오염물질을 차단시키는 levelling compound가 효과적임을 알 수 있는데, Fig. 13에서 보면 차단

막은 3년이 경과하여도 효과적이다. 저알칼리성인 levelling compound와 낮은 물/시멘트 비의 자가 건조 콘크리트를 시공한 본 실험은 추가 건조작업 없이 바닥구조를 만들 수 있음을 나타내었다.

### 5.3 건축 재료의 오염물질 방산 저감 처리에 따른 방산거동

Banno and Tanabe(2001)은 실내 공기 오염을 방지하기 위해서 건축 재료의 여러 가지 개선 처리를 통한 방산 저감 효과를 알아보기 위한 실험을 실행했다. 건축재료 중에서 미처리 바닥재와 2가지의 개선 방법으로 처리한 개선바닥재를 대상으로 실험했는데, 개별 바닥재 방산 실험과 각각의 자재로 방산되는 aldehyde류와 VOCs를 개별 바닥재모델 룸의 바닥과 벽을 측정하는 현장실험과 함께 실험실의 실험도 병행했다.

Fig. 14와 15는 바닥재에서의 개선방법에 따른 aldehyde류와 VOCs의 방산률을 측정된 값을 나타낸다.

먼저 Fig 14를 보면 모델 룸에서는 화학물질 흡

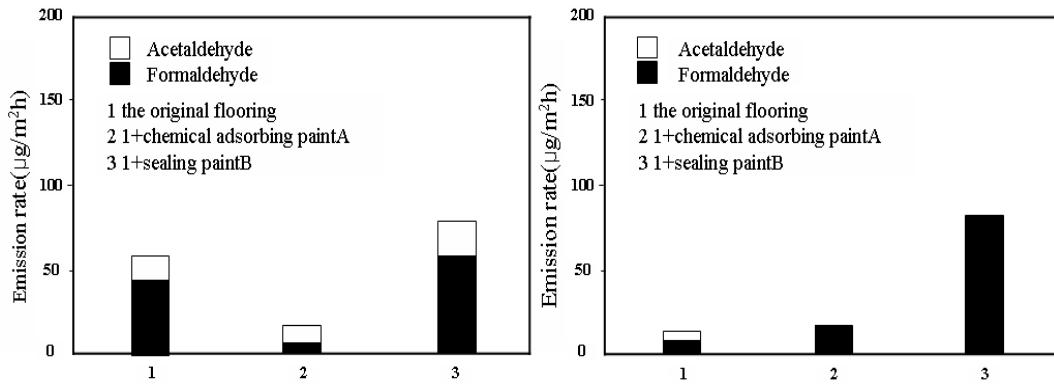


Fig. 14. Aldehydes in a model room(left), and a laboratory(right).

작 페인트 처리를 한 경우는 Formaldehyde의 방산은 감소했으나, 실험실에서는 처리함에 따라 오히려 방산은 증가하였고 Acetaldehyde는 방산되지 않았다. 개선 처리에 따른 VOCs의 방산 저감 효과는 Fig. 15에서 보듯이 나타나지 않았다.

## 6. 결론

실내공기 오염의 주요 원인인 건축 내장 재료에서 방산되는 물질을 측정하는 데는 국가별로 다양

한 기준을 적용하여 각기 다른 방법을 이용하고 있다. 측정법에는 Desiccator법, Perforator법, Large Chamber법, 20L Small Chamber법, 1m³법 등이 있는데, 이 중에서 현재 우리나라에서 환경부 공정 시험법으로 정하고 있는 것은 20L Small Chamber법이다.

건축 내장 재료는 그 종류에 따라 매우 다양한데, 이 재료들의 방산 거동을 측정하여 파악하는 것은 상당히 복잡하고 많은 시일이 소요되는 일이다. 따라서 좀 더 간단하면서도 조작성 용이한 방법을 연구하였는데, 그것이 바로 FLEC(Field and

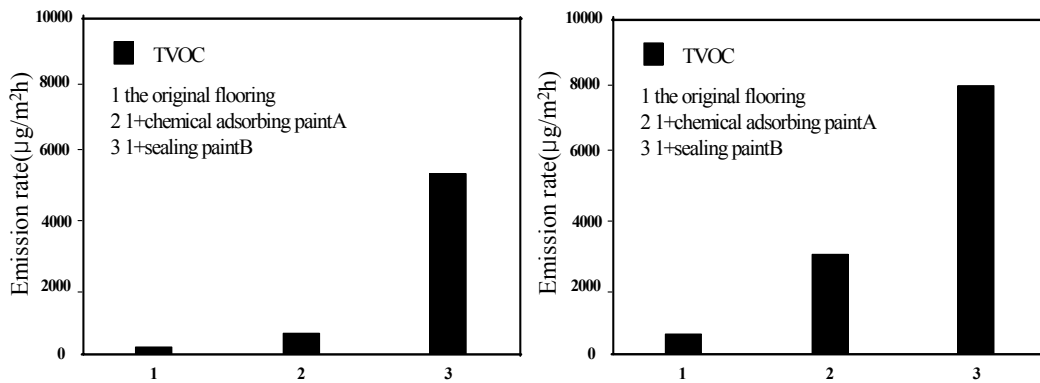


Fig. 15. TVOC in a model room(left), and a laboratory(right).

Laboratory of Emission Cell)법이다. FLEC법은 20L Small Chamber법과 달리 재료를 파괴하지 않으면서 상대적으로 짧은 소요되는 실험시간을 가지면서 생산현장, 시공현장에서의 테스트가 가능한 측정법이다. 기존에 연구된 자료에 의하면 잘 제어된 시험 조건에서 두 가지 20L Small Chamber와 FLEC은 상호연관성이 있는 방산 자료를 제공한다. FLEC의 적용 부분으로의 확장은 그 특징에서 보여줬듯이 상대적으로 쉽고, 신속한 실험 과정과 더불어 반복되어야 하는 실험을 통한 산업적 품질 확보 도구로서 이용하기에 아주 적합하게 한다.

실험실에서 연구가 진행되는 동안 얻어진 경험들은 FLEC이 많은 여러 부분의 방산 측정적용에 적합하고, 20L Small Chamber를 보완하는 유용한 방법이라는 것을 알 수 있게 한다. FLEC에 대한 개념은 지금 유럽 건축재료 지침(European Construction Products Directive)에 맞는 산업이나 실험실에 사용을 위한 동등한 표준시험법(제품/적용) EN13419-2안에서 CEN으로 포함되어 반영되고 있다. 유사한 기초 표준 시험법 DS(draft standards)은 현재 ASTM D 7143-05와 ISO 16000- 10으로 규정되어 있다.

기존의 연구에서 20L Small Chamber법과 FLEC법의 상관성은 상당히 좋은 것으로 알려져 있으나, 현재 우리나라의 건축 재료 방산 측정법인 20L Small Chamber법의 보완을 위해서는 다양한 실험 조건의 변화, 즉 공기의 유동률, 공기의 속도, 온습도, 재료의 전처리 등에 따른 FLEC을 이용한 다양한 방산 실험이 선행되어야 할 것이다.

**사사**

본 연구는 서울시 산학연 협력사업에 의해 수행

되었음.

**참고문헌**

김현중 역 (2004) 새집증후군의 실체와 대응 전략, 한국목재신문사.

김현중 역 (2004) 새집증후군 대책의 바이블, 선진문화사.

김수민, 김현중 (2005) 새집증후군 관리와 Green KS, *Plastics Science*, 218, 41-47.

이영규, 김현중 (2004) 국내 실내 공기질 관리법의 현황과 문제점, *정밀화학*, 73(2), 50-58.

이영규, 양한승, 김현중(2003), 목질복합재료와 실내공기질, *목재공학*, 31(5), 1-4.

KS M 1998-1(2005), 건축내장재의 formaldehyde 및 휘발성 유기화합물 방산량 측정 - 제 1부 : 일반사항.

KS M 1998-2(2005), 건축내장재의 formaldehyde 및 휘발성 유기화합물 방산량 측정 - 제 2부 : 소형체임버법.

KS M 1998-3(2005), 건축내장재의 formaldehyde 및 휘발성 유기화합물 방산량 측정 - 제 3부 : 방산셀법.

KS M 1998-4(2005), 건축내장재의 formaldehyde 및 휘발성 유기화합물 방산량 측정 - 제 4부 : 데시케이터법.

환경부(2003), 오염물질 방출 건축자재 선정관련 연구 최종보고서.

Alexanderson, J. (2001), Emissions Resulting from Alkali Attact on Adhesives and Floor Coverings, *Proceeding of Second International FELC Symposium, Copenhagen*, 76-79.

ASTM D 5582-00 Determining Formaldehyde Levels



- from Wood Products Using a Desiccator.
- Banno, M., and Tanabe, S.-I. (2001), Evaluation of Improvement Techniques for Chemical Pollution in Multi-Family Residential Building by Using FLEC, Proceeding of Second International FELC Symposium, Copenhagen, 90-95.
- EN120 (1991) Wood based panels. Determination of formaldehyde content. Extraction method called the perforator method.
- Jann, O., Wilke, O.(2001) Comparison of FLEC with Other Climate Chambers, German Experiences, Proceeding of Second International FELC Symposium, Copenhagen, 18-27.
- JIS A 1460 (2001) Building boards Determination of formaldehyde emission - Desiccator method.
- Kim, S. and Kim, H.-J. (2004) Evaluation of Formaldehyde Emission of Pine & Wattle Tannin-based Adhesives by Gas Chromatography, Holz als Roh- und Werkstoff, Vol. 62, No.2, pp. 101~106
- Kim, S. and Kim, H.-J. (2005) Comparison of Standard Methods and Gas Chromatography Method in Determination of Formaldehyde Emission from MDF bonded with Formaldehyde-based Resins, Bioresource Technology, 96(13), 1457-1464.
- Kim, S. and Kim, H.-J. (2005) Comparison of Formaldehyde Emission from Building Finishing Materials at various Temperatures in under Heating System; ONDOL, Indoor Air, 15, 317-325.
- Kim, S. and Kim, H.-J. (2005) Effect of Addition of Polyvinyl Acetate to Melamine-Formaldehyde Resin on the Adhesion and Formaldehyde Emission in Engineered Flooring, International Journal of Adhesion & Adhesives, 25, 456-461.
- Kim, S. and Kim, H.-J. The Effects of Edge Sealing Treatment to Wood-based Composites on Formaldehyde Emission Test By Desiccator Method, Polymer Testing, accepted (in press)
- Kim, S. and Kim, H.-J. Evaluation of VOCs Emissions from Building Finishing Materials Using Small Chamber and VOC Analyzer, Indoor and Built Environment, accepted (in press)
- Kim, S., Kim, J.-A, Kim, H.-J. and Kim, S.-D. Determination of Formaldehyde and TVOC Emission Factor from Wood-based Composites by Small Chamber, Journal of Adhesion Science and Technology, accepted (in press)
- Kim, J.-S., Eom, Y.-G., Kim, S. and Kim, H.-J. Effect of Bio-Scavenger on Adhesion Properties and Formaldehyde Emission of Engineered Flooring, Journal of Adhesion Science and Technology, accepted (in press)
- Kleno, J.G., Clausen, P.A., Weschler, C.J. and Wolkoff, P. (2001), Determination of Ozone Removal Rates by Selected Building Products Using the FLEC, Emission Cell, Environ. Sci. Technol. 35, 2548-2553.
- Meininghaus, R. and Uhde, E. (2002) Diffusion Studies of VOC Mixtures in a Building Material. Indoor Air, 12, 215-222.
- Meininghaus, R., Salthanner, T. and Knoppel, H. (1999) Interaction of Volatile Organic Compounds with Indoor Materials - A Small Scale Screening Method, Atmospheric Environment, 33, 2395-2401.

- Nordtest (1995) Building materials, Emission of Volatile Compounds - Field and Laboratory Emission Cell, Nordtest method #438, Espoo, Nordtest.
- Salthammer, T., Meininnghaus, R. and Uhde E. (2001) The Applicability of the FLEC for Industrial Products, Proceeding of Second International FELC Symposium, Copenhagen, 34-40.
- Uchiyama, S., Akimoto, T. and Tanabe, S.-I. (2001) Emission Rate Measurement of Chemical Compounds Emitted from the Thermal Insulating Materials, Proceeding of Second International FELC Symposium, Copenhagen, 110-115.
- Wolkoff, P. (2001) Where Are We With the FLEC ? - An Overview, Proceeding of Second International FELC Symposium, Copenhagen, 1-7.
- Wolkoff, P. (1996) An Emission Cell for Measurement of Volatile Organic Compounds Emitting from Building Materials for Indoor use - the Field and Laboratory Emission Cell FLEC, Gefahrstoff - Reinfaltung der Luft 56, 151-157
- Wolkoff, P., Clausen, P.A., Nielsen, P.A., Gustafsson, H., Jonsson, B. and Rasmusen, E. (1991) Field and Laboratory Emission Cell FLEC, Proceedings of Healthy Buildings, ASHRAE, 160-165.
- Wolkoff, P., Clausen, P.A., Nielsen, P.A. and Gunnarsen, L. (1993) Documentation of Field and Laboratory Emission Cell "FLEC" : Identification of Emission Processes from Carpet, Linoleum, Paint, and Sealant by Modeling, Indoor Air, 3, 291-297.
- Wolkoff, P., Clausen, P.A. and Nielsen, P.A. (1995) Application of the Field and Laboratory Emission Cell "FLEC" - Performance Study, Intercomparison Study, and Case Study of Damaged Linoleum in an Office, Indoor Air, 5, 196-203.
- Wolkoff, P. (1998) Impact of Air Velocity, Temperature, Humidity, and Air on Long-Term Voc Emissions from Building Products, Atmospheric Environment, 32, 2659-2668.
- Zhang, L.Z. and Niu, J.L. (2003), Effects of Substrate Parameters on Emission of Volatile Organic Compounds from Wet Coating Materials, Building and Environment, 38, 939-946.