

# 복합 건축자재의 물질전달계수를 이용한 실내 오염물질 농도 예측방법

## A prediction of indoor pollutant concentration using method mass transfer coefficient in multi-layered building materials

김 창 남\*                      이 윤 규\*\*                      이 승 복\*\*\*                      김 태 연\*\*\*\*  
Kim, Chang Nam              Lee, Yun Gyu                      Leigh, Seung Bok              Kim, Tae Yeon

### Abstract

In order to predict the indoor air pollutant, the VOCs emission rate is used through small chamber in the design process. However, the small chamber method has limitations as the convective mass transfer coefficient, the most important factor when predicting VOCs contamination of indoor air, is different between the small chamber result and the measured data in the actual building. Furthermore, the existing studies which analyzed mass transfer coefficient in the small chamber were directed on the small chambers developed at the time and FLEC(Field and Laboratory Emission Cell), thus, are different from the current small chamber which has been changed with improvements.

The purpose of this study is to determine the emission rate of pollutant in multi-layered building materials, and predict the indoor pollutant concentration through the CFD(Computational of Fluid Dynamics) and CRIAQ2 based on the mass transfer coefficient on single-layered building material by using the current small chamber widely used in Korea. Furthermore, this study used the new convective mass transfer coefficient( $h_m'$ ) which indicates the existing convective mass transfer coefficient( $h_m$ ) including VOC partition coefficient( $k$ ). Also, formaldehyde was selected as target pollutant.

키워드: 실내공기질, 복합건축자재, 물질전달모델, 수치해석, 전산유체역학, 기여율

Keywords: Indoor air Quality, Double-layer building materials, Mass transfer model, Numerical analysis, CFD, CRIAQ1

## 1. 서 론

### 1.1 연구배경 및 목적

최근 건축물의 고기밀화로 인한 환기부족과 복합 화학 건축자재의 무분별한 사용으로 건축물의 실내공기 오염 문제가 심각하게 대두되고 있다. 특히 현대사회에서 사람들이 실내에 머무는 시간이 전체 거주시간의 90% 이상이며, 밀폐된 공간 내에서의 오염이라는 점을 고려할 때 건축물 내에서의 실내공기질(IAQ, Indoor Air Quality)문제는 국민건강과 복지의 측면에서 우선적으로 고려되어야 할 사항이다. 이와 관련하여, 최근 건축물의 계획단계에서 실내공기의 오염농도를 예측하기 위하여 다양한 방법이 연구되고 있으며, 그중 국내에서도 많이 진행되고 있는 것 중의 하나가 소형챔버법에 의한 건축자재 오염물

질 방출량의 이용이다. 하지만 소형챔버법을 통해 측정된 건축자재의 오염물질 방출량을 이용하여 실내오염농도를 예측할 경우, 실제 측정값과 상당 부분 차이를 보이고 있다. 이를 보완하기 위해 건축자재의 물질전달모델(Mass transfer model)을 기반으로 한 예측방법이 도입되었다. 그러나 이 방법 역시 건축자재의 오염물질 방출에 있어서 중요한 요소 중의 하나인 대류물질전달계수( $h_m$ )가 소형챔버와 실제 건축공간과 차이를 보여, 이를 이용하여 실내 오염농도를 예측하는 것 또한 문제점을 안고 있으며, 소형챔버내의 건축자재 물질전달계수(Mass Transfer Coefficient)를 해석한 연구 사례는 몇몇 보고되어지고 있으나, 대부분의 연구가 개발 당시의 소형챔버 및 FLEC(Field and Laboratory Emission Cell)을 대상으로 하여 많은 개량을 통해 형태가 다소 변화된 현재의 소형챔버와 많은 차이를 보일 것으로 예상된다.

이러한 맥락에서, 본 연구는 현재 국내에 다수 보급되어 사용되고 있는 소형챔버를 대상으로 단일건축자재의

\* 주저자, (주)코오롱건설 기술연구소

\*\* 한국건설기술연구원, 선임연구원

\*\*\* 연세대학교 교수, 건축학박사

\*\*\*\* 교신저자, 연세대학교 교수, 공학박사 (kim@yonsei.ac.kr)

물질전달계수를 도출하여 복합건축자재의 오염물질 방출량을 예측하고 이를 이용하여 실내오염농도를 예측하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 적용대상은 주거 건물로 한정하였으며, 대상 건축자재는 주거건물의 내장재로 사용되고 있는 Wall paper와 PVC floor material, Gypsum board로 선정하였다. 더불어 국내에서 진행되고 있는 대부분의 연구가 주로 단일건축자재로 대상을 한정하고 있는 것과는 달리, 본 연구에서는 벽지용 복합건축자재와 바닥재용 복합건축자재를 연구 대상 건축자재로 선정하여, 건축공간에 좀더 실질적으로 이용될 수 있는 건축자재의 오염물질 방출량을 예측하였다. 대상 오염물질로는 실내 마감재에서 방출되는 화학물질 중 Formaldehyde를 선정하였다. 본 연구의 진행 방법은 다음과 같다.

1) 소형챔버내 복합건축자재의 Formaldehyde 방출량 예측

복합건축자재를 구성하고 있는 단일건축자재의 물질전달계수를 기본적으로 도출하였다. 먼저 소형챔버내 대류 물질전달계수( $h_m'$ )를 도출하기 위하여 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석방법을 이용하였고, 여기에서 얻은 대류물질전달계수( $h_m'$ )를 수치해석에 입력하였다. 이를 통해 예측된 단일건축자재의 Formaldehyde 방출량과 소형챔버법을 통해 측정된 단일건축자재의 Formaldehyde 방출량에 커브 피팅(curve-fitting)방법<sup>1)</sup>을 적용하여 단일건축자재의 초기농도( $C_0$ )와 확산계수( $C_m$ )를 도출하였다. 이런 방법으로 도출된 단일건축자재의 물질전달계수( $h_m'$ ,  $C_0$ ,  $C_m$ )를 다시 수치해석에 입력하여 복합건축자재의 Formaldehyde 방출량을 예측하였다.

2) 복합건축자재의 Formaldehyde 방출량을 이용한 실내 Formaldehyde농도 예측

수치해석으로 예측된 복합건축자재의 Formaldehyde 방출량과 실내 오염물질 발생원의 실내 공기환경에 대한 기여도를 해석하는 실내 기여율 CRIAQ<sup>2)</sup>을 적용하여 CFD 해석으로 실내중량의 Formaldehyde 농도를 예측하였다.

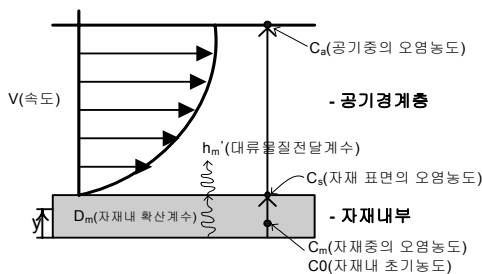


그림 1. 건축자재의 VOCs 방출 메카니즘

2. 소형챔버내 복합건축자재의 Formaldehyde 방출량 예측

2.1 단일건축자재의 물질전달계수 도출을 위한 해석 이론 구성

본 연구에서 건축자재의 VOCs 방출과정은 Huang<sup>3)</sup>의 해석 이론을 적용하였으며 이에 따른 건축자재의 VOCs 방출과정 매커니즘과 각 단계에서의 물질전달계수는 그림 1과 같다. 단일건축자재의 물질전달계수를 도출하기 위하여 최근 그 신뢰성이 입증되어 건축환경 공학분야에서 많이 이용되고 있는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석방법과 수치해석(Numerical Analysis)방법을 동시에 이용하였다. CFD 해석방법을 이용한 대류물질전달계수( $h_m'$ )도출에서는 정상상태 해석을 실시하였으며, 수치해석 방법을 이용한 자재내부 확산계수( $D_m$ )과 초기농도( $C_0$ )도출에서는 비정상상태 해석을 수행하였다. 정밀도 높은 계산을 위하여 유한차분법을 기본으로 하여 단위 공간의 해석을 실시하였고 또한 공기영역내에서 자재내부로 흡착되는 오염물질은 고려하지 않았으며, 온도에 대한 오염물질 의존성 역시 고려하지 않았다.

Huang의 연구에서는 대류물질전달계수( $h_m$ )와 자재/공기분배계수( $k$ )를 구분하여 도출하였지만, 본 연구에서는 기존 대류물질전달계수( $h_m$ )와 자재/공기분배계수( $k$ )의 물리적 의미에 포함하는 대류물질전달계수( $h_m'$ )를 새롭게 정의하여 이를 이용하였다. 자재 내부에서의 VOCs 이동은 1차원 확산으로 가정하였으며, 초기 VOCs 농도는 자재내부 및 자재표면에 균일하게 분포하는 것으로 가정하였다. 더불어 자재 하부면의 오염물질 유출입은 없는 것으로 가정하였고, 챔버내로 유입되는 공기와 챔버내의 공기는 VOCs 농도가 '0'인 순수공기인 것으로 가정하였다. 자재 내부에서의 VOCs 이동은 식(1)과 같은 Fick의 비정상 확산 방정식이 지배방정식으로 사용된다.

$$\frac{dC_m(y,t)}{dt} = D_m \frac{d^2 C_m(y,t)}{dt^2} \tag{1}$$

여기에서,  $C_m$  : 자재내부의 오염물질 농도 [ $mg/m^3$ ]  
 $D_m$  : 자재내부의 오염물질 확산계수 [ $m^2/s$ ]  
 $y$  : 오염물질 확산방향 길이 [ $m$ ]  
 $t$  : 시간 [ $s$ ]

자재 표면 및 공기 경계층의 VOCs 물질전달은 표면에서의 상변화 그리고, 공기 경계층에서의 대류와 확산에 의해 일어나며 이는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_m = h_m'(C_s - C_a) \tag{2}$$

여기에서,  $q_m$  : 오염물질 방출속도 [ $mg/m^2h$ ]  
 $h_m'$  : 대류물질전달계수 [ $m/s$ ]  
 $C_s$  : 자재표면에서의 공기영역 오염물질농도 [ $mg/m^3$ ]  
 $C_a$  : 공기중 오염물질 농도 [ $mg/m^3$ ]

1) Huang, Haghghat, 2002, Modeling of volatile organic compounds emission from dry building materials, Building and Environment, vol. 37, Issue 12, pp. 1349-1360. 2002.  
 2) 김태연의 2명, 실내중량농도에 대한 오염물질 발생원의 기여율 해석, 대한건축학회 학회지, vol. 23, Issue 2, 2003.  
 3) Huang, Haghghat, 2002, Modeling of volatile organic compounds emission from dry building materials, Building and Environment, vol. 37, Issue 12, pp. 1349-1360. 2002.

표 1. CFD 해석조건(챔버)

구분	경계 조건	
소형 챔버	환기 횟수	0.5 회
	용량	20L
	유입 오염물질 농도	0 mg/m <sup>3</sup>
CFD 시뮬레이션	난류 모델	층류
	Mesh 수	518,000 개
	오염물질 공기중의 확산계수	1.5×10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s
	Re수*	44

\* 유입구의 풍속, 직경을 기준으로 산정

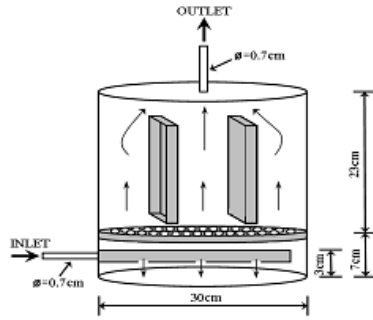


그림 2. 해석대상 소형챔버

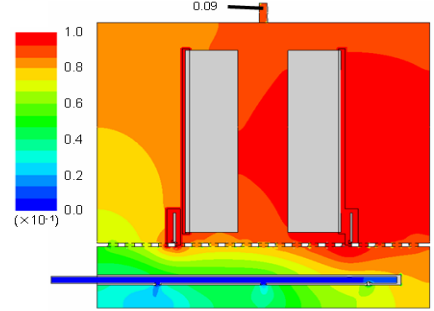


그림 3. 대류물질전달계수(h<sub>m</sub>')도출위한 소형챔버 농도해석

공기영역의 오염물질 농도는 완전 혼합되어 챔버 전체에서 동일한 농도를 유지하는 것으로 가정하며, 이때의 질량균형은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC_m}{dt} = NC_{in} - NC_a - \frac{A}{V} D_m \frac{dC_m}{dy} \quad (3)$$

여기에서,  $N$  : 환기효율 [S<sup>-1</sup>]  
 $C_m$  : 급기된 공기의 오염물질 농도 [mg/m<sup>3</sup>]  
 $A$  : 자재의 유효면적 [mg/m<sup>2</sup>]  
 $V$  : 실의 부피 [m<sup>3</sup>]

## 2.2 소형챔버내의 대류물질전달계수(h<sub>m</sub>') 도출

소형챔버내의 경계층에서의 오염물질 방출속도는 식(2)와 같고 자재 표면으로부터의 오염물질 방출속도는 식(4)와 같다.

$$q_m = Q(C_o - C_i) \quad (4)$$

여기에서,  $q_m$  : 오염물질 방출속도 [mg/s]  
 $Q$  : 소형챔버 환기량 [m<sup>3</sup>/s]  
 $C_o$  : 배기구의 오염물질 농도 [mg/m<sup>3</sup>]  
 $C_i$  : 급기구의 오염물질 농도 [mg/m<sup>3</sup>]

공기층 영역인 경계층의 물질전달은 재료의 표면위로 기류가 발생함에 따라 경계층이 발생하는데, 경계층내의 오염물질 이동은 대류와 확산에 의해 결정된다. 오염물질의 경계층에서의 방출속도는 식(5)와 같이 표현된다.

$$q_m = h_m' A_m (C_s - C_a) \quad (5)$$

여기에서,  $A_m$  : 방출면 면적 [m<sup>2</sup>]  
 $C_a$  : 공기 중 오염물질 농도 [mg/m<sup>3</sup>]  
 $C_s$  : 자재표면에서의 공기영역 오염물질농도 [mg/m<sup>3</sup>]

오염물질의 경계층에서의 CFD 시뮬레이션에 의해 자재표면의 오염물질 농도를 알 수 있다면, 식(2)와 식(4), (5)에 의해 대류물질전달계수(h<sub>m</sub>')를 구할 수 있다.

$$h_m' = \frac{Q(C_o - C_i)}{A(C_s - C_a)} \quad (6)$$

신선공기의 유입, 유출에 따른 오염물질의 농도는 CFD 방

법4)에 의해 해석하였다. 내부 Re수가 매우 낮은 관계로 난류 모델을 사용하지 않고 층류를 이용하였으며, 자재표면의 오염물질 농도(ρ)를 일정하게 고정하여 자재표면으로부터의 대류물질전달계수(h<sub>m</sub>')를 해석하였다. CFD 해석을 위한 상세 조건은 표1과 같으며, 해석대상 소형챔버를 모델링한 결과를 그림 2에 나타내었다. 대류물질전달계수(h<sub>m</sub>')도출을 위한 소형챔버 농도 해석결과는 그림3과 같으며, CFD 해석결과 도출된 대류물질전달계수(h<sub>m</sub>')는 0.022mg/m<sup>2</sup>h로 이것을 Lewis의 관계7) 식(6)에 의해 대류열전달계수로 환산하면 0.0076W/m<sup>2</sup>°C로 매우 작은 값을 나타낸다.

$$h_c = Le \times \rho \times C_p \quad (6)$$

여기에서,  $h_c$  : 대류열전달계수  
 $Le$  : Lewis 수 (1.0)  
 $\rho$  : 공기의 밀도  
 $C_p$  : 공기의 비열

통상 건축 공간의 대류열전달계수8)가 4~6W/m<sup>2</sup> 정도라고 하면 약 100배 정도 작은 값을 나타내는 것으로, 만일 동일한 표면농도를 가질 경우, 소형챔버와 건축공간에서의 오염물질 방출량은 많은 차이를 나타내게 된다. 따라서 소형챔버에 의한 방출량 데이터를 실내 공기질 예측에 그대로 사용할 경우 많은 오차를 유발시킬 수 있을 것으로 판단된다. 단, 이러한 경우는 자재 내부의 확산계수(D<sub>m</sub>)가 대류물질전달계수(h<sub>m</sub>')와 비슷한 조건일 경우에 해당되며 만일 자재 내부의 확산계수(D<sub>m</sub>)이 대류물질전달계수(h<sub>m</sub>')보다 매우 작을 경우 오염물질 방출은 자재 내부의 확산계수(D<sub>m</sub>)에 의해 결정되게 된다.

- 김태연의 2명, 실내중양농도에 대한 오염물질 발생원의 기여율 해석, 대한건축학회 학회지, vol. 23, Issue 2, 2003.
- 김태연, 오염물질 발생원의 실내 공기질에 관한 기여율 해석, 대한건축학회 학회지, vol. 29, Issue 2, 2004.
- 박병운의 2명, 온돌용 마루와 가구에서 발생하는 휘발성유기화합물 농도감소 예측에 관한 연구, 대한건축학회 학회지, vol. 21, Issue 6, 2005.
- ASHRAE Fundamentals, 1993.
- Fariborz H. and Hongyu, H., 2003, "Integrated IAQ model for prediction of VOC emissions from building material", Building and Environment, vol. 38, Issue 6, pp. 1007-1017.

표 2. 단일건축자재의 수치해석조건

이산화하기위한 자재내부의 분할수	500		
자재의 두께 (d:mm)	Wall paper	PVC floor material	Gypsum board
	0.5	2	9
자재의 표면적 (A:m <sup>2</sup> )	Wall paper	PVC floor material	Gypsum board
	0.0226745 (148mm×135mm)		
대류물질전달계수 (h <sub>m</sub> ' :mg/m <sup>2</sup> h)	0.022	챔버 용량 (L)/ 총 해석시간 (day)	20 / 7
챔버 환기횟수 (ACH)	0.5	시간 간격 (s)	1800

표 3. 도출된 단일건축자재의 물질전달계수

단일 건축자재	D <sub>m</sub> (m <sup>2</sup> /s)	C <sub>0</sub> (mg/m <sup>3</sup> )
Wall paper	1.30×10 <sup>-12</sup>	5.00×10 <sup>2</sup>
PVC floor material	1.30×10 <sup>-16</sup>	9.50×10 <sup>4</sup>
Gypsum board	1.80×10 <sup>-10</sup>	1.20×10 <sup>2</sup>

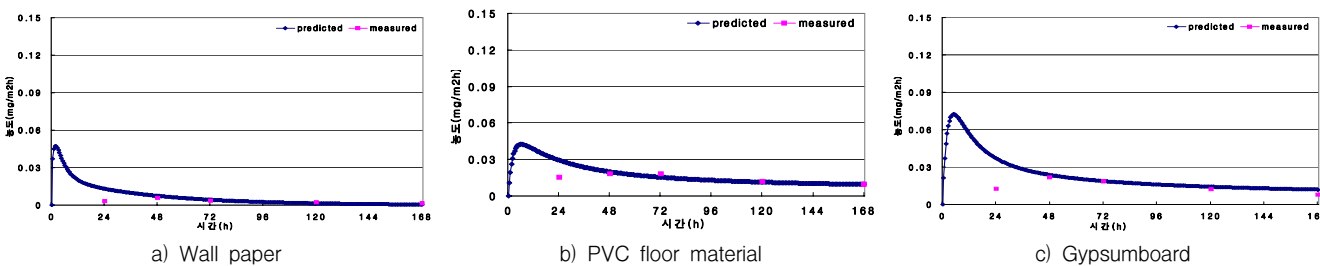


그림 4. 물질전달계수 도출을 위한 측정값과 예측값과의 커브 핏팅(Curve-fitting)

2.3 단일 건축자재의 물질전달계수 도출

CFD해석을 통해 도출된 소형챔버내의 대류물질전달계수 (h<sub>m</sub>')를 수치해석에 입력하여 단일 건축자재의 Formaldehyde 방출량을 예측하고 이를 소형챔버 실험을 통해 측정된 Formaldehyde 방출량과 커브 핏팅(Curve-fitting)하여 단일 건축자재의 물질전달계수인 자재내부 확산계수(D<sub>m</sub>)과 초기농도(C<sub>0</sub>)를 도출하였다. 수치해석을 위한 해석조건은 표2와 같으며 수치해석을 통한 Formaldehyde 방출량 예측값과 측정값과의 커브 핏팅(Curve-fitting) 및 도출된 물질전달계수는 그림4 및 표3과 같다.

2.4 복합 건축자재의 Formaldehyde 방출량 예측

복합건축자재의 Formaldehyde 방출량을 예측하기 위하여 사용된 모델은 그림5 및 표4와 같이 Zhang<sup>9)</sup>에 의해 제안된 복합건축자재의 물질전달모델이 사용되었다.

1) 수치해석 조건

앞서 CFD해석을 통해 도출된 소형챔버내의 대류물질전달계수(h<sub>m</sub>')와 수치해석(Numerical Analysis)을 통해 도출된 단일 건축자재의 확산계수(D<sub>m</sub>), 초기농도(C<sub>0</sub>)를 다시 수치해석 조건으로 입력하여 복합건축자재의 Formaldehyde 방출량을 예측하였다. 복합건축자재 내부에서는 1차원 확산이 일어나는 것으로 가정하였고, 자재 내부의 초기 오염물질 농도는, 실제 자재내의

위치에 따라 다르게 분포하나 예측이 어려워 자재내부에 균일하게 분포하는 것으로 가정하였다. 또한 자재의 각 component와 layer의 온도차이 효과는 무시하였고 하나의 component와 각 layer는 동질성을 가진 재질로 가정하였다. Wall paper와 Gypsum board로 구성된 벽지용 복합건축자재와 PVC floor material과 Gypsum board로 구성된 바닥재용 복합건축자재를 대상으로하여 Formaldehyde 방출량을 예측하였으며, 초기 및 경계조건은 표5와 같고, 수치 해석 시 사용된 조건은 표6과 같다.

2) 복합건축자재의 Formaldehyde 방출량 예측 결과

예측된 소형챔버내의 복합건축자재의 Formaldehyde 방출량은 그림 6과 같다. 벽지용 복합건축자재의 경우, 초기 2시간까지 급격하게 증가하였다가 이후부터 12시간까지 감소하였고, 다시 12시간이후부터 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 120시간이 지나면서 증가율은 서서히 낮아지고 있다. 이러한 벽지용 복합자재의 Formaldehyde 방출 양상 원인은 Wall paper의 확산계수(D<sub>m</sub>)가 상대적으로 작았고, Gypsum board의 자재내 초기농도(C<sub>0</sub>)는 상대적으로 높았기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 작은 확산계수(D<sub>m</sub>)로 인해 Gypsum board 내부의 Formaldehyde가 실험 초반 12시간동안은 Wall paper를 투과하지 못하여 실내공기중에 영향을 미치지 않다가 12시간이후부터 Wall paper를 투과하여 실내 공기중의 농도로 나타나기 시작하고 있음을 알 수 있다. 바닥재용 복합건축자재의 경우는,

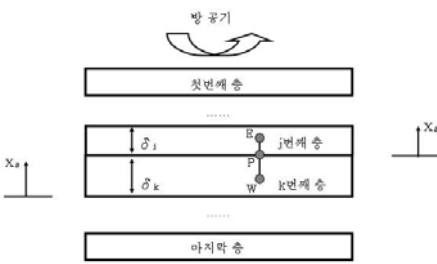


그림 5. 복합건축자재의 물질전달모델

표 4. 복합건축자재의 물질전달모델이론

자재내부	$\frac{dC_{mij}(x,t)}{dt} = D_{mij} \frac{d^2 C_{mij}}{dx_j^2}$
자재와 공기사이의 물질전달	$q_i = h_m'(C_{ma} - C_a)$
챔버내 공기	$\frac{dC_a(t)}{dt} = NC_{\infty} - NC_a(t) + \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{V} q_i$

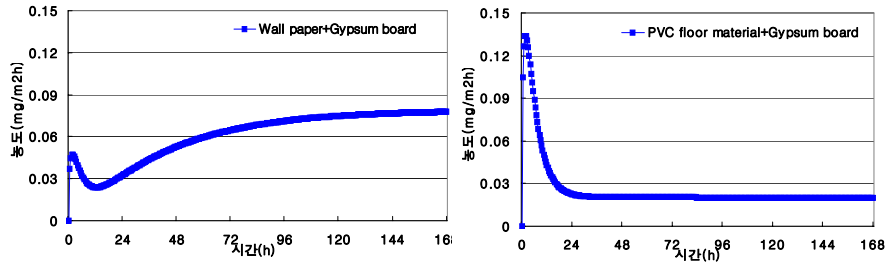
표 5. 복합건축자재의 초기 및 경계조건

유입공기의 농도	$C_{a, inlet} = 0$
챔버내 공기중의 농도	$C_{a,0} = 0$
i번째 component의 m번째 layer의 가장 바깥쪽	$-\frac{dC_{min}}{dx_{\infty}} \Big _{x_{\infty}=0} = 0$



표 6. 복합건축자재의 수치해석 조건

자재내부의 분할수	500		
자재의 두께 (dmm)	벽지용 복합자재	바닥재용 복합자재	
	Wall paper	Gypsum board	PVC floor material
	0.5	9	2
자재의 노출 표면적 (A <sub>m2</sub> )	Wall paper	Gypsum board	PVC floor material
	0.0226745 (148mm×135mm)		
챔버 용량 (L)	20	챔버 환기횟수 (ACH)	0.5
총 해석시간 (day)	7	시간 간격 (s)	1800



a) Wall paper + Gypsum board      b) PVC floor material + Gypsum board  
그림 6. 복합 건축자재의 Formaldehyde 방출량 예측

표 7. 실내오염농도 예측위한 CFD 해석조건

난류 모델	Standard k-ε model	
Mesh	75372	
유입조건	개구부면적	0.230 m <sup>2</sup>
	유입풍속	0.1992 m/s (=0.3 회/h)
유출조건	개구부면적	0.230 m <sup>2</sup>

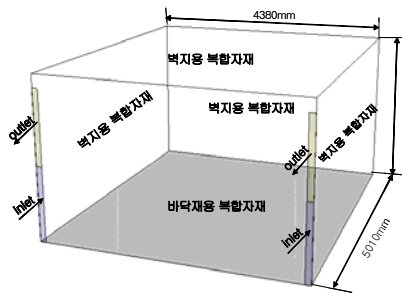


그림 7. 실내오염농도 해석대상 모델링

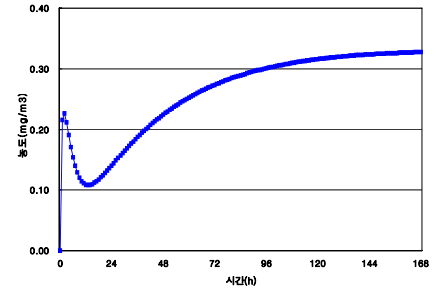


그림 8. 복합건축자재의 Formaldehyde 방출량을 통한 실내오염농도 예측

초반 2시간까지 급격하게 증가하였다가 24시간까지는 급격하게 감소하였고 이후부터는 매우 서서히 감소하는 방출량을 보이고 있다. 즉 Gypsum board 내부의 Formaldehyde가 실험 초반부터 PVC floor material을 투과하여 PVC floor 내부의 Formaldehyde와 함께 12시간까지 실내공기중 농도로 나타났다가 24시간까지 다시 급격히 감소, 이후부터는 서서히 감소되고 있다. 결국 PVC floor material의 상대적으로 큰 확산계수(D<sub>m</sub>)로 인해 Gypsum board 내부의 Formaldehyde가 실험초반부터 PVC floor material을 투과하여 바닥재용 복합자재의 Formaldehyde 방출에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

### 3. 복합건축자재의 물질전달계수를 이용한 실내오염 농도 예측

복합건축자재의 물질전달계수와 수치해석을 통해 예측된 7일(168h)간의 벽지용 및 바닥재용 복합자재의 Formaldehyde 방출량을 토대로 실내오염농도를 예측하였다. 실내중량의 Formaldehyde 농도 예측에는 CFD해석과 실내 오염물질 발생원의 실내 공기환경에 대한 기여도 CRIAQ1<sup>10)</sup>을 이용하였다. CRIAQ1은 오염물질 발생량의 발생강도에 대한 농도의 변화율로 정의되며 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$CRIAQ1(x, n) = dC_w(x, n) / |C_{w,n}| \quad (7)$$

여기에서,

$dC_w(x, n)$  : 위치x에서 오염물질 발생원n에 의해 발생한 기준농도로부터의 변화량[kg/kg]

$C_{x,n}$  : 오염물질 발생원i가 독립적으로 발생하였을 경우의 실내의 완전확산농도[kg/kg]

CFD 해석을 위한 해석조건은 표7과 같으며, 모델링은 그림7과 같다. CFD해석과 CRIAQ1를 통해 예측된 실중량의 Formaldehyde 농도변화를 그림8에 나타내었다. 실중량의 Formaldehyde 농도변화를 살펴보면 실험 초반 4시간까지 급격하게 상승하였다가 18시간까지 급격히 감소하였으며, 이후부터는 다시 상승하는 농도변화를 보이고 있다. 이는 벽지용 복합건축자재의 Formaldehyde 방출량 변화와 비슷한 양상으로, 실험 초반 벽지용 복합건축자재와 바닥재용 복합건축자재의 영향을 동시에 받아 Formaldehyde 방출량이 급격히 상승하였고, 이후 바닥재용 복합건축자재의 농도가 급격히 감소하는 영향으로 인해 실내오염농도 역시 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 이후부터는 벽지용 복합건축자재의 농도가 점차적으로 증가하는 영향으로 실내오염농도가 서서히 증가하는 현상을 보였다. 이를 통해 복합건축자재에서 오염물질 방출특성에 따라 실내오염물질 농도특성이 결정되며, 특히 상대적으로 위쪽에 위치한 자재내부 확산계수(D<sub>m</sub>)에 따라 그 아래에 위치한 자재의 Formaldehyde가 공기중으로 방출되는 시기를 결정하는 요소가 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

### 4. 결론

본 연구에서는 현재 국내에 다수 보급되어 사용되고 있는 소형챔버를 대상으로 하여 단일 건축자재의 물질전달계수를 도출

- Zhang, L. Z., Niu, J. L., "Modeling VOCs emissions in a room with a single-zone multi-component multi-layer technique", Building and Environment, vol. 39, Issue 5, pp.5203. 2004.
- 김태연, 오염물질 발생원의 실내공기질에 관한 기여율해석, 대한건축학회, vol. 20, Issue 2, pp. 211, 2004

하였고, 이를 바탕으로 복합건축자재의 오염물질 방출량을 예측하였다. 이러한 방법으로 예측된 복합건축자재의 오염물질 방출량을 토대로 실내오염농도를 예측하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 기존의 대류물질전달계수( $h_m$ )과 자재/공기분배계수( $k$ )의 물리적 의미를 동시에 포함하는 대류물질전달계수( $h_m'$ )를 새롭게 정의하여, 기존의 복잡한 건축자재의 VOCs 물질전달모델을 간략화 및 단순화 하였다. 또한 컴퓨터 계산상 필요시되는 절대적 시간을 단축하기 위하여 수치해석과 CFD해석방법을 동시에 이용하는 통합해석방법(Integrated Analysis Method)을 제안 및 적용하여 실내오염농도 예측에 필요한 계산시간을 줄일 수 있었다.

(2) 국내에 다수 보급되어 사용되고 있는 20L 소형챔버를 대상으로 도출된 대류물질전달계수( $h_m'$ )는 0.022 g/m<sup>2</sup>h였으며, 이는 실제건축공간과 약 1000배 정도의 차이를 보이는 수치로, 소형챔버로 측정된 건축자재의 오염물질 방출량을 이용하여 실내오염농도를 예측하는 방법에는 모순이 있음을 밝혀내었다.

(3) CFD 해석을 통해 도출된 소형챔버내의 대류물질전달계수( $h_m'$ )를 수치해석에 입력하여 예측된 Formaldehyde 방출량과 소형챔버 실험으로 측정된 Formaldehyde 방출량과의 커브 피팅(Curve-fitting)을 통해 단일건축자재의 확산계수( $D_m$ )와 초기농도( $C_0$ )를 도출할 수 있었다.

(4) 앞서 도출된 단일건축자재의 물질전달계수를 다시 수치해석에 입력하여 복합건축자재의 Formaldehyde 방출량을 예측하였다. 벽지용 복합건축자재의 경우 Wall paper의 상대적으로 작은 자재내부 확산계수( $D_m$ )로 인해 Gypsum board 내부의 Formaldehyde가 12시간이후에 실내공기중의 농도로 나타나는 특징을 나타냈으며, 이와는 달리 바닥재용 복합건축자재의 경우 Gypsum board 내부의 Formaldehyde 방출량이 초반 2시간부터 PVC floor material 내의 Formaldehyde와 함께 실내공기중의 농도로 나타났다.

(5) 수치해석을 통해 예측된 복합건축자재의 Formaldehyde 방출량과 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석 및 CRIAQ1를 통해 실내 중앙농도를 예측한 결과, 복합건축자재에서 상대적으로 위쪽에 위치한 자재내부 확산계수( $D_m$ )에 따라 그 아래에 위치한 자재의 Formaldehyde가 공기중으로 방출되는 시기를 결정하는 요소가 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

석, 대한건축학회 학회지, vol. 23, Issue 2, 2003.

5. 김태연, 오염물질 발생원의 실내 공기질에 관한 기여율 해석, 대한건축학회 학회지, vol. 29, Issue 2, 2004.
6. 박병윤외 2명, 온돌용 마루와 가구에서 발생하는 휘발성유기화합물 농도감소 예측에 관한 연구, 대한건축학회 학회지, vol. 21, Issue 6, 2005.
7. ASHRAE Fundamentals, 1993.
8. Fariborz H. and Hongyu, H., 2003, "Integrated IAQ model for prediction of VOC emissions from building material", Building and Environment, vol. 38, Issue 6, pp. 1007-1017
9. Zhang, L. Z., Niu, J. L., "Modeling VOCs emissions in a room with a single-zone multi-component multi-layer technique", Building and Environment, vol. 39, Issue 5, pp.5203. 2004.
10. 김태연, 오염물질 발생원의 실내공기질에 관한 기여율해석, 대한건축학회, vol. 20, Issue 2, pp. 211, 2004

### 참고문헌

1. Huang, Haghghat, 2002, Modeling of volatile organic compounds emission from dry building materials, Building and Environment, vol. 37, Issue 12, pp. 1349-1360. 2002.
2. 김태연의 2명, 실내중앙농도에 대한 오염물질 발생원의 기여율 해석, 대한건축학회 학회지, vol. 23, Issue 2, 2003.
3. Huang, Haghghat, 2002, Modeling of volatile organic compounds emission from dry building materials, Building and Environment, vol. 37, Issue 12, pp. 1349-1360. 2002.
4. 김태연의 2명, 실내중앙농도에 대한 오염물질 발생원의 기여율 해