

수치해석 및 CFD를 이용한 소형챔버내 복합건축자재의 오염물질 방출량 예측

김 창 남*, 이 승 복, 김 태 연
*(주)코오롱건설 기술연구소, 연세대학교 건축공학과

A Prediction of Pollutant Emission Rate using Numerical Analysis and CFD in Double-Layered Building Materials

Chang Nam Kim[†], Seung Bok Leigh, Taeyeon Kim

**Construction Research Team, Kolon Engineering and construction, Yongin 449-815, Korea
Department of Architecture, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*

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 double-layered building materials through the CFD(Computational of Fluid Dynamics) and Numerical analysis based on the mass transfer coefficient on singled-layered building material by using the current small chamber widely used in Korea. Futhermore, 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.

Key words: Numerical Analysis(수치해석), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Small chamber(소형챔버), Double-Layered Building Materials(복합건축자재), Mass transfer model(물질전달모델)

기 호 설 명

- | | |
|--|------------------------------------|
| C_m : 자재내부의 오염물질 농도 [mg/m^3] | D_m : 자재내부 오염물질 확산계수 [m^2/s] |
| | y : 오염물질 확산방향 길이 [m] |
| | t : 시간 [s] |
| [†] Corresponding author | q_m : 오염물질 방출속도 [mg/m^2h] |
| Tel: +82-2-393-4066, fax: +82-2-365-4668 | h_m' : 대류 물질전달계수 [m/s] |
| E-mail address: changnam97@hotmail.com | C_s : 자재표면에서의 공기영역 오염물질 농 |

- 도 [mg/m³]
- C_a : 공기중의 오염물질 농도 [mg/m³]
- N : 환기 효율 [S⁻¹]
- C_{in} : 급기된 공기의 오염물질 농도 [mg/m³]
- A : 자재의 유효 면적 [m²]
- V : 실의 부피 [m³]
- Q : 소형챔버 환기량 [m³/s]
- C_o : 배기구의 오염물질 농도 [mg/m³]
- C_i : 급기구의 오염물질 농도 [mg/m³]

1. 서론

1.1 연구의 목적

최근 건물의 고기밀화 및 화학물질을 방출하는 건축자재의 무분별한 사용으로 인하여 건축물의 실내공기오염 문제가 심각하게 대두되고 있다.⁽¹⁾ 특히 현대사회에서 사람들은 가정, 직장, 학교, 자동차와 같은 실내공간에서 많은 시간을 보내고 있기 때문에 실내 공간에 존재하는 위험한 물질들에 노출됨으로써 호흡기 질환등과 같은 다양한 증상을 겪을 수 있다.⁽²⁾

실내공기 오염이 인체에 미치는 이러한 악영향 때문에 사회적으로 실내공기오염문제에 대한 인식이 점차 높아지고 있으며 실내 공기질을 개선하려는 많은 움직임들이 일고 있다.

실내공기오염 문제를 해결하기 위한 방법으로는 건축자재의 오염물질 방출 저감 및 환기에 의한 오염물질 배출 등을 들 수 있으며, 이 중 건축자재로부터의 오염물질 방출량은 실내오염농도를 사전에 예측하여 이에 대한 대책을 마련하기 위한 가장 기초적이고 중요한 부분이라고 할 수 있다. 이와 관련하여 소형챔버내 건축자재의 오염물질 방출량을 예측하기 위하여 건축자재의 물질전달계수(Mass transfer coefficient)를 이용한 예측방법이 주로 국내·외에서 시도되고 있다. 그러나 대부분의 연구가 개발 당시의 소형챔버를 대상으로 하여 많은 개량을 통해 형태가 다소 변화한 현재의 소형챔버와 많은 차이를 보일 것으로 예상되며, 실제 건축공간에서 적용되는 복합건축자재 보다는 단일 건축자재의 오염물질 방출량 예측에 초점을 맞추고 있는 상황이다.

이러한 맥락에서 본 연구는, 현재 국내에 다수

보급되어 보편화되고 있는 20L 소형챔버를 대상으로 수치해석(Numerical Analysis)과 CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학) 해석방법⁽³⁾을 통해 단일 건축자재의 물질전달계수(Mass transfer coefficient)를 도출하고, 이를 바탕으로 복합건축자재의 오염물질 방출량을 예측하여, 실제 실내의 오염물질 농도를 예측하는데 기초자료로 활용되는 것에 목적이 있다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 적용대상 건축자재는 주거건물의 내장재로 사용되고 있는 Wall paper와 PVC floor material, Gypsum board로 선정하였다. 더불어 국내에서 진행되고 있는 대부분의 연구가 주로 단일자재로 대상을 한정하고 있는 것과는 달리, 본 연구에서는 벽지용 복합자재와 바닥재용 복합자재를 연구 대상 건축자재로 선정하여, 건축공간에 좀 더 실질적으로 이용될 수 있는 건축자재의 오염물질 방출량을 예측하였다. 또한 실내 마감재에서 방출되는 화학물질 중 Formaldehyde를 대상 오염물질로 선정하였다. 본 연구는 다음과 같은 방법으로 진행되었다.

1) 소형챔버내 단일 건축자재의 물질전달계수 도출

복합자재를 구성하고 있는 단일 건축자재의 물질전달계수를 기본적으로 도출하였다. 먼저 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석방법을 이용하여 소형챔버내 자재표면의 대류 물질전달계수(h_m')를 도출하였다. 본 연구에서 도출한 대류 물질전달계수(h_m')는 기존연구⁽⁴⁾에서 정의하는 건축자재의 물질전달계수 중 자재/공기분배계수(k)와 대류물질전달계수(h_m)의 물리적 의미를 동시에 포함한 계수이다. 위에서 도출한 대류물질전달계수(h_m')를 수치해석에 입력하였고, 이를 통해 예측된 단일 건축자재의 Formaldehyde 방출량과 소형챔버법을 통해 측정된 단일 건축자재의 Formaldehyde 방출량에 커브 핏팅(curve-fitting)방법⁽⁵⁾을 적용하여 단일 건축자재의 물질전달계수를 도출하였다.

2) 소형챔버내 복합 건축자재의 Formaldehyde 방출량 예측

도출된 단일 건축자재의 물질전달계수를 다시 수치해석에 입력하여 복합 건축자재의

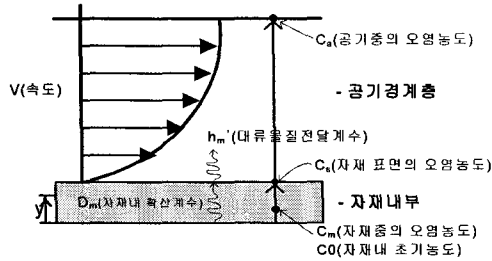


Fig. 1 VOCs emission mechanism of building material.

Formaldehyde 방출량을 예측하였다.

2. 물질전달 계수 도출을 위한 해석이론 구성

본 연구에서 건축자재의 VOCs 방출과정은 기존연구의 해석이론⁽⁶⁾을 적용하였으며 이에 따른 건축자재의 VOCs 방출과정 메커니즘과 각 단계에서의 물질전달계수는 Fig. 1과 같다. 자재 내부에서의 VOCs 이동은 1차원 확산으로 가정하였으며, 초기 VOCs 농도는 자재내부에 균일하게 분포하는 것으로 가정하였다. 더불어 자재 하부면의 오염물질 유출입은 없는 것으로 가정하였고, 챔버내로 유입되는 공기는 VOCs 농도가 '0'인 순수공기인 것으로 가정하였다. 자재 내부에서의 VOCs 이동은 식(1)과 같은 Fick의 비정상 확산 방정식이 지배방정식으로 사용된다.

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

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

$$q_m = h_m'(C_s - C_a) \quad (2)$$

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

Table 1 CFD analysis conditions

Analysis conditions		
Small Chamber	Air exchange rate	0.5 ACH
	Volume	10.1m ³
CFD	Inlet pollutant concentration	0 mg/m ³
	Turbulence model	Laminar flow
	Mesh	518,000
	Diffusion coefficient in air	1.5×10 ⁻⁵ m ² /s
	Re*	44

* 유입구의 풍속, 직경을 기준으로 산정

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

3. 소형챔버내 대류물질전달계수 및 단일 건축자재의 물질전달계수 도출

3.1 CFD를 통한 소형챔버내 자재 표면의 대류 물질전달계수 도출

소형챔버내의 경계층에서의 오염물질 방출속도는 식(2)와 같고 자재 표면으로부터의 오염물질 방출속도는 식(4)와 같다. CFD 시뮬레이션에 의해 자재표면의 오염물질 농도를 알 수 있다면, 식(2)와 식(4), (5)에 의해 대류물질전달계수(h_m')를 구할 수 있다.

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

$$h_m' = \frac{Q(C_o - C_i)}{A(C_s - C_a)} \quad (5)$$

신선공기의 유입, 유출에 따른 오염물질의 농도는 CFD 방법⁽⁷⁾⁽⁸⁾에 의해 해석하였다. 내부 Re 수가 매우 낮은 관계로 난류모델을 사용하지 않고 층류를 이용하였으며, 자재표면의 오염물질 농도⁽⁹⁾를 일정하게 고정하여 자재표면으로부터의 대류물질전달계수(h_m')를 해석하였다. CFD 해석을 위한 상세 조건은 Table1과 같으며, Fig. 2와 Fig. 3과 같이 CFD 해석결과 도출된 대류물질전달계수(h_m')는 0.022mg/m²h로 이것을 Lewis의 관계⁽¹⁰⁾에 의해 대류열전달계수로 환산하면 0.0076W/m²°C로 매우 작은 값을 나타낸다. 통상 건축 공간의 대류열전달계수가 4~6W/m² 정도

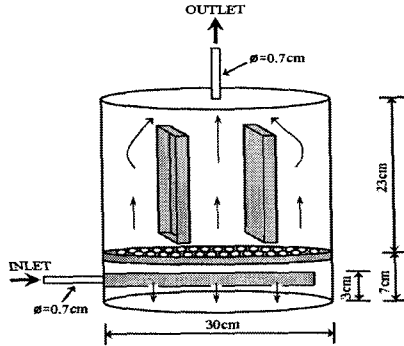


Fig. 2 Small chamber

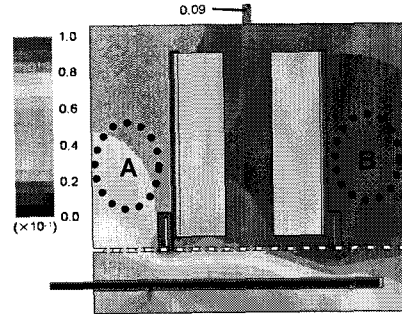
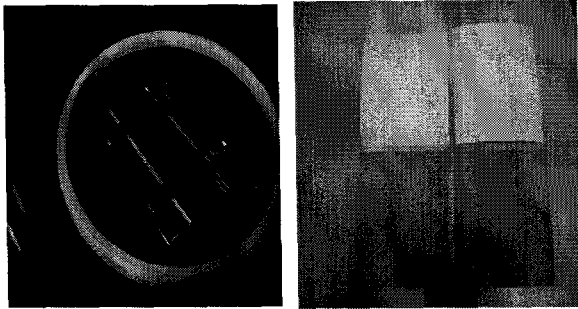


Fig. 3 CFD analysis result



(a) small chamber (b) building materials

Fig. 4 Small chamber test

Table 2 Numerical analysis conditions of one-layered building materials

Grid	500		
Thickness (mm)	Wall paper	PVC floor material	Gypsum board
	0.5	2	9
Area (m ²)	Wall paper	PVC floor material	Gypsum board
	0.0226745 (148mm×135mm)		
h_m' (mg/m ² h)	0.022	Chamber volume (L)/ Analysis duration (day)	20/7
Air exchange rate(ACH)	0.5	Time step (s)	1800

라고 하면 약 1000배 정도 작은 값을 나타내는 것으로, 만일 동일한 표면농도를 가질 경우, 소형 챔버와 건축공간에서의 오염물질 방출량은 많은 차이를 나타나게 된다. 따라서 소형챔버에 의한 방출량 데이터를 실내 공기질 예측에 사용할 경우 많은 오차를 유발시킬 수 있다.

3.2 수치해석을 통한 단일 건축자재의 물질전달계수 도출

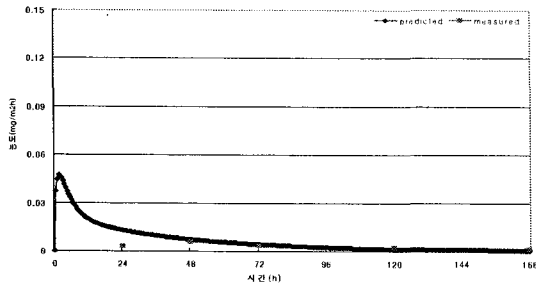
CFD해석을 통해 도출된 소형챔버내의 자재 표면의 대류물질전달계수(h_m')를 수치해석에 입력하여 단일 건축자재의 Formaldehyde 방출량을 예측하고 이를 Fig. 4와 같이 소형챔버 실험을 통해 측정된 Formaldehyde 방출량과 커브 핏팅(Curve-fitting)하여 단일 건축자재의 물질전달계수인 자재내부 확산계수(D_m)와 초기농도(C_0)를 도출하였다. 수치해석을 위한 해석조건은 Table 2와 같으며 수치해석을 통한 Formaldehyde 방출량 예측값과 측정값과의 커브 핏팅(Curve-fitting

) 및 도출된 물질전달계수는 Fig. 5 및 Table 3과 같다.

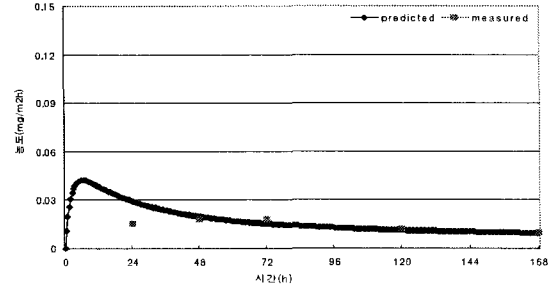
4. 복합 건축자재의 방출량 예측

앞서 CFD해석을 통해 도출된 소형챔버내 자재 표면의 대류물질전달계수(h_m')와 수치해석(Numerical Analysis)을 통해 도출된 단일 건축자재의 확산계수(D_m), 초기농도(C_0)를 다시 수치해석 조건으로 입력하여 복합건축자재의 Formaldehyde 방출량을 예측하였다. Wall paper와 Gypsum board로 구성된 벽지용 복합건축자재와 PVC floor material과 Gypsum board로 구성된 바닥재용 복합건축자재를 대상으로 하여 Formaldehyde 방출량을 예측하였으며, 수치해석시 사용된 조건은 Table 4와 같다.

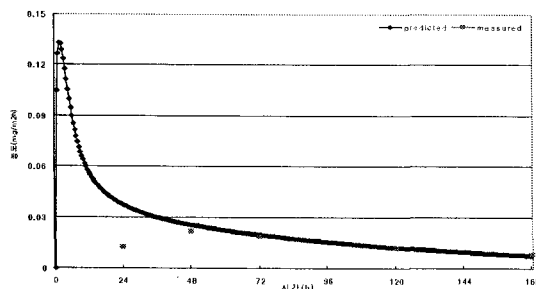
예측된 소형챔버내의 복합 건축자재의 Formaldehyde 방출량은 Fig. 6과 같다. 벽지용 복합자재의 경우, 초기 2시간까지 급격하게 증가하였다가 이후부터 12시간까지 감소하였고, 다시



a) Wall paper



b) PVC floor material

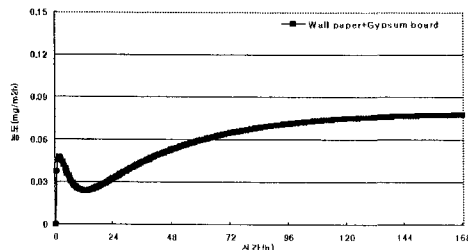


c) Gypsum board

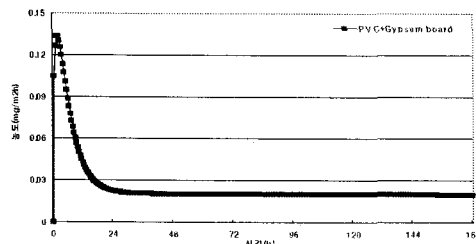
Table 3 Mass transfer coefficients of building materials

Building materials	$D_m(m^2/s)$	$C_0(mg/m^3)$
Wall paper	1.30×10^{-12}	5.00×10^2
PVC floor material	1.30×10^{-16}	9.50×10^4
Gypsum board	1.80×10^{-10}	1.20×10^2

Fig. 5 Curve-fit results with measured data



a) Wall paper + Gypsum board



b) PVC floor material + Gypsum board

Fig. 6 Prediction results of double-layered building materials

Table 4 Numerical analysis condition of double-layered building materials

Grid	500		
Thickness (mm)	Double-layered building material for wall		Double-layered building material for floor
	Wall paper	Gypsum board	PVC floor material
	0.5	9	2
Area (m ²)	Wall paper	Gypsum board	PVC floor material
	0.0226745 (148mm×135mm)		
Chamber Volume (L)	20	Air exchange rate of Small chamber (ACH)	0.5
Analysis duration (day)	7	Time step (s)	1800

12시간이후부터 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 120시간이 지나면서 증가율은 서서히 낮아지고 있다. 이러한 벽지용 복합소재의 Formaldehyde 방출 양상 원인은 Wall paper의 확산계수(D_m)가 상대적으로 작았고, Gypsum board의 자체내 초기농도(C_0)는 상대적으로 높았

기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 작은 확산계수 (D_m)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 복합재의 경우는, 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_m)로 인해 Gypsum board 내부의 Formaldehyde가 실험초반부터 PVC floor material을 투과하여 바닥재용 복합재의 Formaldehyde 방출에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

자재의 초기농도(C_0)와 확산계수(D_m)를 안다면, 소형챔버내 자재표면의 대류물질전달계수(h_m) 대신 공기중의 대류물질전달계수(h_m')을 대입하여, 실내공기중의 오염농도를 예측할 수 있을 것으로 사료되며, 더불어 단일건축자재의 Formaldehyde 방출양상과 복합재의 Formaldehyde 방출양상이 다르다는 사실을 통해, 실내오염농도 예측시에는 실제 시공되는 복합재의 Formaldehyde 방출량을 이용하여야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 현재 국내에 다수 보급되어 사용되고 있는 20L 소형챔버를 대상으로 하여 단일건축자재의 물질전달계수를 도출하였고, 이를 바탕으로 복합재의 오염물질 방출량을 예측하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 국내에 다수 보급되어 사용되고 있는 20L 소형챔버를 대상으로 도출된 자재 표면의 대류물질전달계수(h_m)는 $0.022 \text{ g/m}^2\text{h}$ 였으며, 본 연구에서 도출한 대류물질전달계수(h_m)는 기존 건축자재의 물질전달계수에서 자재/공기분배계수(k)와 대류물질전달계수(h_m)의 물리적 의미를 동시에 포함한 계수이다.

(2) 도출된 소형챔버내의 대류물질전달계수(h_m)를 수치해석에 입력하여 예측된 Formaldehyde 방출량과 소형챔버 실험을 통해 측정된 Formaldehyde 방출량과의 커브 피팅(Curve-fitting)을 통해 단일 자재의 확산계수

(D_m)와 초기농도(C_0)를 도출하였다.

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

참고문헌

1. Kim, C. N., Lee, Y. G. and Han, K. W., 2004, A study on concentration change of VOCs in Indoor Air Quality, Proceedings of the AIK, pp. 983-986.
2. Kjell, A., et al., 2000, The Right to Healthy Indoor Air, Report on WHO Meeting., EUR/00/5020494.
3. Kim, T. Y., Lee, Y. G. and Han, K. W., 2003, Contribution ration of Pollutant Source to Concentration of Room Center, Proceedings of the AIK, pp. 809-812.
4. Huang, Haghightat, 2002, Modeling of volatile organic compounds emission from dry building materials, Building and Environment, vol. 37, Issue 12, pp. 1349-1360. 2002.
5. Huang, Haghightat, 2002, Modeling of volatile organic compounds emission from dry building materials, Building and Environment, vol. 37, Issue 12, pp. 1349-1360. 2002.
6. Huang, Haghightat, 2002, Modeling of volatile organic compounds emission from dry building materials, Building and Environment, vol. 37, Issue 12, pp. 1349-1360. 2002.
7. Kim, T. Y., Lee, Y. G. and Han, K. W., 2003, Contribution ration of Pollutant Source to Concentration of Room Center, Proceedings of the AIK, pp. 809-812.
8. Kim, T. Y., 2004, Analysis of contribution ration of Pollutant Source, AIK, vol. 29, Issue 2.
9. Park, B. Y., 2005, Prediction of VOCs concentration decrease from floor material and furniture, AIK, vol. 21, Issue 6.
10. ASHRAE Fundamentals ,1993