

수치해석을 활용한 합판마루 바닥재의 VOCs 방출에 관한 연구

김 지 혜, 강 동 화, 최 동 희, 김 선 숙, 여 명 석[†], 김 광 우^{*}
 서울대학교 대학원, ^{*}서울대학교 건축학과

A Study on the Numerical Analysis of VOCs Emission from Plywood Floor Material

Ji-Hye Kim, Dong-Hwa Kang, Dong-Hee Choi,
 Sun-Sook Kim, Myoung-Souk Yeo[†], Kwang-Woo Kim^{*}

Department of Architecture, Graduate School, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

^{}Department of Architecture, College of Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea*

(Received July 20, 2005; revision received October 13, 2005)

ABSTRACT: The floor material is known as the most influential emission source of the residential building, because most floor material is made of wood compound and adhesive like a plywood flooring. Moreover, floor heating system keeps the inside temperature of the material high. As the emission of hazardous chemical compound from the construction material is influenced by many factors, it is necessary to analyze the emission characteristics of the floor material to improve IAQ. In this study, numerical analysis is performed to investigate the emission characteristics of the floor material affected by several factors such as temperature, air exchange rate, initial concentration, and internal diffusion coefficient. A simulation program is also written based on the mass transfer theory. The simulation results show that there is some level of difference on the TVOC concentration when each of the factors is variable.

Key words: Floor material(바닥재), VOCs emission(VOCs 방출), Mass transfer model(물질전달모델), Numerical analysis(수치해석)

기 호 설 명

A : 자재 방출면적 [m^2]

b : 자재 두께 [m]

C : VOCs 농도 [$\mu g/m^3$]

D : VOCs 확산계수 [m^2/s]

E : 아레니우스 경험상수 [무차원]

h : 대류물질전달계수 [m/s]

k : 자재/공기 분배계수 [무차원]

N : 환기회수 [ACH]

$R(t)$: VOCs 방출속도 [$mg/m^2 \cdot h$]

S : Sutherland 상수 [K]

T : 온도 [K]

t : 시간 [s]

V : 실부피 [m^3]

y : 자재 내부의 VOCs 확산방향 [m]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-880-7353; fax: +82-2-883-7353

E-mail address: msyeo@snu.ac.kr

그리스 문자

ν : 공기 동점성계수 [m^2/s]

하첨자

- 0 : 초기
- a : 공기영역
- as : 자재인접공기
- in : 급기
- m : 자재 내부
- out : 배기
- ref : 기준

1. 서론

최근 신축건물 실내공기의 위해성에 대한 인식이 널리 확산됨에 따라, 실내공기질에 대한 관심과 개선요구가 증대되고 있다. 신축건물 실내공기 오염의 주된 원인으로는 복합 화학물질로 구성된 건축자재 및 가구류의 사용 증가와 에너지절약을 위한 단열강화 및 고기밀화로 인한 실내환기량 부족 등을 들 수 있다. 특히 건축자재 및 가구류는 포름알데히드나 휘발성유기화합물(VOCs) 등 각종 오염물질의 주요 방출원으로 작용하게 되므로, 각 재료의 오염물질 방출특성을 파악하는 것은 실내공기질을 예측하고 개선하기 위한 기본적인 절차라 할 수 있다.

건축자재에서 방출되는 오염물질은 자재 내부의 초기농도, 자재 내부의 확산계수, 분배계수 등과 같은 자재의 물리적 특성 관련 인자와 기류속도, 환기율, 실내 온·습도 조건 등의 실내환경 관련 인자의 영향을 받게 된다.⁽¹⁾ 특히, 실내 마감재는 공정상 시공이 가장 늦게 이루어지며 실내공기에 바로 면하기 때문에 실내오염농도에 큰 영향을 미치게 된다. 그중에서도 바닥재는 오염물질 방출이 높은 목질 복합재 및 접착제로 구성된 합판 및 강화마루가 주로 사용되고 있으며 국내 주거건물에서 일반적으로 적용되고 있는 바닥난방의 경우 자재 내부를 높은 온도로 유지하게 되므로 주거건물에서 바닥재가 실내공기질에 미치는 영향이 높다고 할 수 있다.

본 연구에서는 VOCs 방출이론을 바탕으로 시뮬레이션 프로그램을 작성하여, 이를 소형 챔버 실험을 통해 검증하였고, 시뮬레이션을 실시하여 우리나라 주거건물의 바닥재로 많이 사용되고 있는 온돌마루의 물리적 특성 및 실내환경 관련 인자 변화에 따른 VOCs 방출특성 및 실내공기질에

미치는 영향을 분석하였다.

2. 건축자재의 VOCs 방출 모델링

2.1 VOCs 방출 및 해석이론

물질전달 이론은 크게 건자재와 습자재의 물질 전달로 구분되며, 온돌마루와 같은 바닥 마감재는 건자재에 해당하므로 건자재 해석 이론⁽²⁾을 적용하였다. 건자재의 VOCs의 방출과정 메커니즘은 Fig. 1과 같이 도식화할 수 있다.

VOCs의 자재 영역에서는 단 방향으로만 물질 전달이 일어나는 것으로 가정하였으며, 식(1)과 같은 Fick의 비정상확산방정식이 지배방정식으로 사용된다.

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

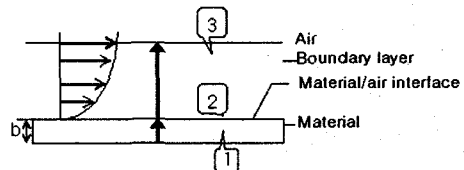
자재 표면에서의 상변화가 평형상태를 유지한다고 가정하면 식(2)와 같은 Linear형 등온식⁽³⁾으로 표현 가능하다.

$$C_m(b, t) = kC_{as} \quad (2)$$

자재 표면 상부의 경계층에서의 VOCs 물질전달은 대류와 확산에 의해 일어나며 경계층에서의 물질전달률은 식(3)과 같다.

$$R(t) = h_m(C_{as} - C_a) \quad (3)$$

실내의 공기는 완전혼합된 것으로 가정하고, 이때의 실내 질량균형을 식(4)와 같이 표현할 수 있다.



- 1. Internal diffusion
- 2. Material/air interface
- 3. Surface convection, diffusion

Fig. 1 The VOCs emission mechanism of dry material.⁽²⁾

Table 1 Boundary and initial condition

Stage	Equation
Material	$C_m(y, 0) = C_0$
Air boundary	$C_a(0) = C_{a0}$
Bottom surface of the material	$-D_m \frac{\partial C_m(y, t)}{\partial y} \Big _{y=0} = 0$
Material/air interface	$-D_m \frac{\partial C_m(y, t)}{\partial y} \Big _{y=b} = h_m(C_{as} - C_a) = h_m \left\{ \frac{C_m(b, t)}{k} - C_a \right\}$

$$\frac{\partial C_a}{\partial t} = NC_{in} - NC_{out} - \frac{A}{V} D_m \frac{\partial C_m(y, t)}{\partial y} \Big|_{y=b} \quad (4)$$

$$D_a(T) = 5.398 \times 10^{-6} \left(\frac{T}{296} \right)^{1.5} \quad (6)$$

$$\nu(T) = \nu_{ref} \times \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{1.5} \frac{T_{ref} + S}{T + S} \quad (7)$$

모델링에 적용된 경계조건 및 초기조건은 다음 Table 1과 같다. 자재 바닥면에서의 VOCs 유출입은 없고, 바닥 마감재 내부에서는 1차원 확산이 일어나는 것으로 가정하였으며, VOCs의 농도가 초기에 균일하게 분포하는 것으로 가정하였다.

또한 공기영역의 VOCs의 농도는 완전 혼합되어 실 전체에서 동일한 농도를 유지하며, 실내로 유입되는 공기는 VOCs의 농도가 0인 순수공기인 것으로 가정하였다.

2.2 VOCs 방출의 온도 의존성

실내에 설치된 마감재에서 방출되는 화학물질은 마감재의 온도, 실내공기의 온도에 따라서 방출량이 증가하게 된다. 이와 같은 물질전달현상의 온도 의존성을 해석하기 위하여 온도 의존성이론⁽⁴⁾을 선택하여 프로그램에 적용하였다. 자재 내부의 온도 의존성은 식(5)와 같고, 공기영역의 온도 의존성은 식(6), 식(7)과 같이 나타낼 수 있다. 수분의 물질전달현상과 달리 화학물질의 전달현상에서 물질전달량은 수분전달량에 비해 매우 적으므로 물질전달에 의한 열전달은 무시하였다. 따라서 열전달에 의한 온도변화가 물질전달에 미치는 영향만이 고려가 되었으며, 건자재에 해당되는 해석이론만을 적용하였다.

$$D_m(T) = D_{m,ref} \exp \left\{ -E \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{273 + T_{ref}} \right) \right\} \quad (5)$$

2.3 수치해석

본 연구에서는 8mm 두께의 합판마루 내부를 1차원 확산을 가정하여 9개의 노드로 분할하였다. 공간이산화는 유한체적법, 시간이산화는 시간간격을 1분으로 하여 안정된 해를 보장하는 암시적 기법(implicit scheme)을 적용, 해석하였다. 설

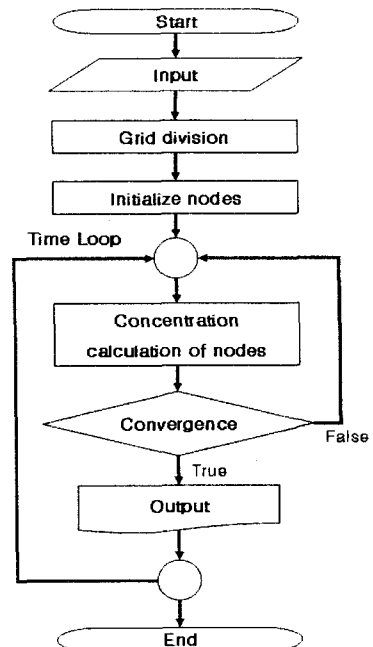


Fig. 2 Analysis process of the program.

정된 초기조건 및 경계조건과 함께 Gauss-Seidel 반복법을 사용하여 수치해를 구하였다. 모델링의 해석 흐름도는 Fig. 2와 같다.

2.4 평가모델 검증

분석대상 은돌마루의 오염물질 방출특성을 평가하기 위한 모델의 검증을 실시하였다. 실험을 통하여 모델의 해석에 필요한 계수를 추정하였고, 추정된 계수값을 프로그램에 입력하여 시뮬레이션 예측값과 챔버실험을 통해 얻어진 데이터를 비교하였다. 평가모델의 검증을 위한 흐름도는 Fig. 3과 같다.

2.4.1 검증실험의 방법 및 조건

커브피팅을 활용하여 계수를 추정하기 위한 실험과 커브피팅 결과로 추정한 계수값의 타당성 판단을 위한 실험이 각각 진행되었다. 확산계수, 초기농도 및 아레니우스 경험상수를 추정하기 위해 은돌마루에 대하여 Table 2의 Experiment 1, 2와 같은 조건에서 6일 동안 9차베에 걸쳐 TVOC의 농도를 측정하였다. Experiment 1, 2로 획득한 계

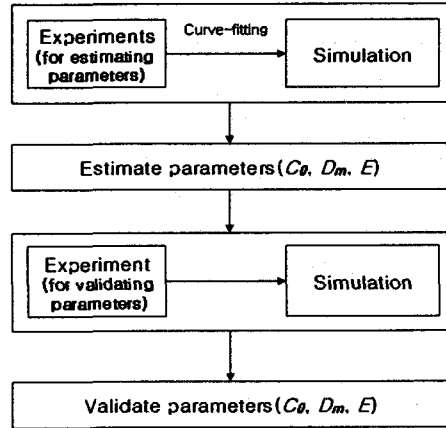


Fig. 3 Validation process of the model.

수검증을 위해 동일한 자재로 Table 2의 Experiment 3과 같은 조건에서 소형 챔버실험을 수행하였다. 실험에는 20 L의 스테인리스 챔버를 사용하였고, 챔버 시스템 회로와 구성은 각각 Fig. 4, Fig. 5와 같다. 챔버의 배기로부터 시료를 Tenax TA 튜브에 포집하였고, 이를 가열 탈착시켜 GC/MS로 분석하였다. TVOC의 농도를 구하기 위하

Table 2 Emission test condition

Items	Experiment 1	Experiment 2	Experiment 3
Material	Plywood flooring	Plywood flooring	Plywood flooring
Temperature	25°C	35°C	25°C
Air exchange rate	0.5 ACH	0.5 ACH	0.2 ACH
Loading factor	1 m ² /m ³	1 m ² /m ³	1 m ² /m ³
Duration	6 days	6 days	6 days

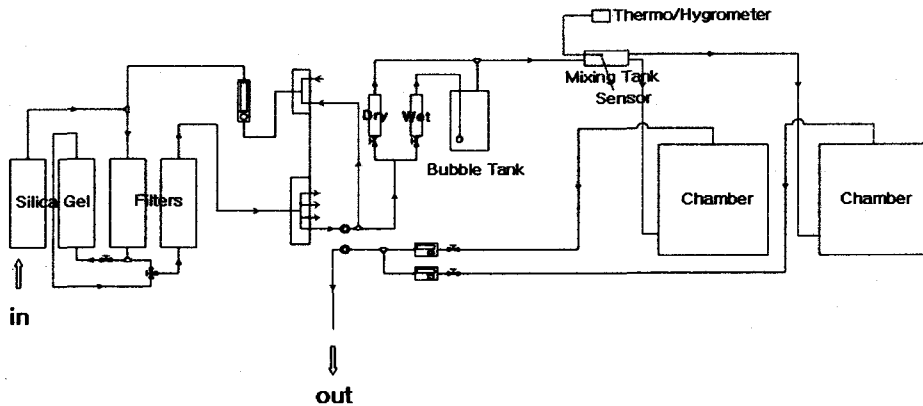


Fig. 4 Flow diagram of small chamber system.

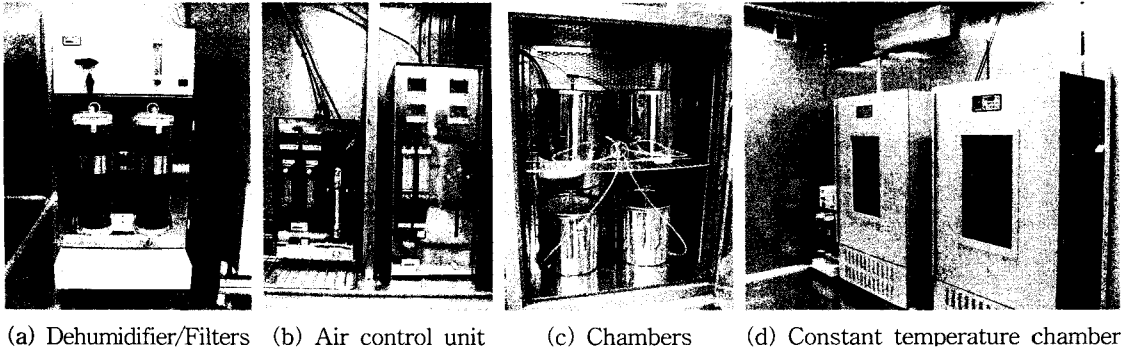


Fig. 5 Small chamber system.

여 TIC(Total Ion Chromatograph)를 이용하여 헥산~헥사데칸까지의 VOCs를 정량하였고, 톨루엔 검량선을 활용하였다.

2.4.2 계수추정

온돌마루의 VOCs 방출 시물레이션을 수행하기 위하여 자재의 물리적 특성 관련 인자와 실내환경 관련 인자에 대한 입력값이 필요하다.

이들 입력값 중 자재 내부의 초기농도, 자재 내부의 확산계수, 분배계수, 아래니우스 경험상수 등과 같은 자재의 물리적 특성 관련 인자를 결정하는 것은 매우 어려운 일이다. 이들을 결정하는 방법은 직접측정법과 추정법으로 구분할 수 있다. 직접측정법⁽⁴⁾은 실측자재에 대한 실제적인 데이터를 구해낼 수 있다는 장점이 있으나, 기술적인 한계 등에 의한 오차발생, 비용, 시간 등의 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 데이터 적합곡선(curve-fitting)을 활용한 추정법을 사용하여, 자재 내부의 확산계수와 초기농도를 추정하였으며,

방출 초기에만 영향을 미치는 분배계수는 기존 연구문헌⁽⁵⁾에서 측정된 값을 활용하였다.

커브피팅은 다음과 같은 2단계를 거쳐 각각 초기농도와 확산계수를 추정한다.

- Step 1 예측값과 챔버실험에 의한 실측값을 비교한 후, 농도값이 best fit이 성립되는 초기농도(C_0)를 결정한다(그래프의 높이결정).
- Step 2 시간에 따른 농도변화 곡선이 best fit이 성립되는 확산계수(D_m)를 결정한다(그래프의 기울기결정).

온도조건이 바뀌는 경우에 대한 시물레이션을 실시하는 경우, 온도조건을 달리하여 실험을 추가로 실시한 후, 위의 2단계를 거쳐 식(5)에 의해 아래니우스 경험상수(E)를 추정한다.

전술된 방법으로 온돌마루의 챔버실험(Experiment 1, 2) 측정값과 시물레이션 예측값을 curve-fitting하였고, 그 결과는 Fig. 6과 같다. 이때 추정된 계수값 초기농도(C_0), 확산계수(D_m), 아래니우스 경험상수(E)와 기존문헌에서 참고한 분배계수(k)는 Table 3과 같다. 기존문헌을 고찰한 결과 합판의 경우 D_m 은 $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$,⁽⁵⁾ E 는 $1000 \sim 17300$ ⁽⁶⁾의 범위로, 추정된 계수값이 타당한 것으로 확인되었다.

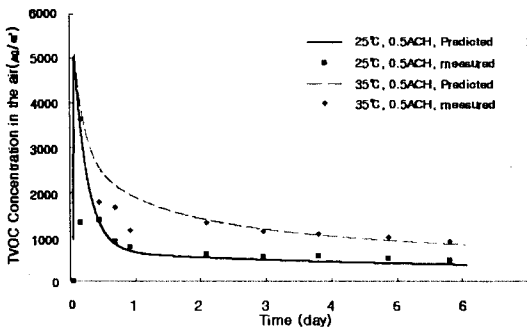


Fig. 6 Curve-fit results with measured data (Experiment 1, 2).

Table 3 Properties of plywood

Parameters	Values
D_m (m^2/s)	1.3×10^{-12}
C_0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2.96×10^7
k (-)	3289
E (-)	15000

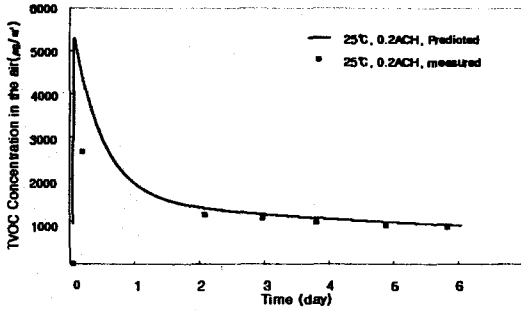


Fig. 7 Comparison between the predicted result and the measured data (Experiment 3).

2.4.3 검증결과

커브피팅을 통해 추정한 계수값을 프로그램에 입력하여 시뮬레이션을 실시하였고, 이를 실험값과 비교하였다. 조건을 다르게 하여 실시한 챔버 실험(Experiment 3)의 자재방출량 실측값과 시뮬레이션 예측값은 Fig. 7과 같다. 실험값과 시뮬레이션값을 비교한 결과 $R^2=0.996$ 으로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3. 온돌마루 바닥재의 VOCs 방출특성

온돌마루의 VOCs 방출에 영향을 미치는 자재의 물리적 특성 관련 인자와 실내환경 관련 인자 중 특히, 자재온도, 환기율, 자재의 초기농도, 자재의 확산계수는 작은 변화에도 실내의 VOCs 농도에 크게 영향을 미치는 요소이다. 따라서 이들 인자들의 변화에 따른 오염물질 방출특성을 파악하는 것이 필요하다. 이를 위해 앞서 작성된 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 자재의 오염물질 방출특성을 분석하였다.

3.1 해석방법 및 시뮬레이션 Case

3.1.1 해석방법

해석공간은 Fig. 8과 같이 3m×3m×2.2m(W×D

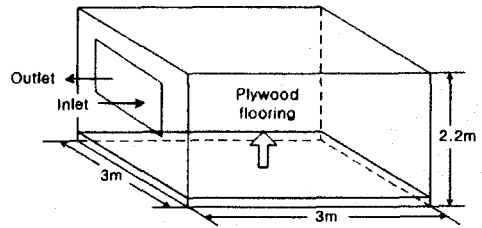


Fig. 8 Schematic diagram of the room.

×H) 크기의 직육면체 단일공간을 대상으로 하였다. 대상공간은 TVOC 농도가 0인 외기가 유입되는 것으로 가정하였다. 해석 대상공간의 TVOC 방출원은 바닥면에만 설치되어 있으며 3m×3m (W×D)의 합판마루가 설치되어 있는 것으로 가정하였다. 합판마루 하단에서의 VOCs 유출입은 없는 것으로 가정하였고, 자재 내부에서 VOCs의 이동은 일차원 확산이 일어나는 것으로 가정하였다. 또한 자재에서 방출되는 VOCs는 공기 중에서 완전 혼합되어 실 전체에서 동일한 농도를 유지하는 것으로 가정하였다. 합판마루의 TVOC 방출과 관련한 물성치는 프로그램의 검증에서 사용된 값을 사용하였다.

3.1.2 시뮬레이션 Case

자재온도, 환기율, 자재의 초기농도, 자재의 확산계수의 독립적인 변화에 따른 온돌마루의 VOCs 방출특성을 파악하기 위하여 분석하고자 하는 인자 외의 다른 인자에 대해서는 동일한 조건을 유지하면서 각 인자별로 5~6개로 해석 케이스를 설정하였다. 본 시뮬레이션에서는 시간의 변화에 따른 공기 중 TVOC 농도의 연속적인 변화를 분석하였다. 시뮬레이션의 해석 케이스는 Table 4와 같다.

3.2 결과 및 고찰

Fig. 9는 자재온도의 변화에 따른 TVOC의 공

Table 4 Simulation case

Factors	Cases
$T(^{\circ}C)$	25, 30, 35, 40, 45, 50
$N(ACH)$	0.2, 0.5, 1, 2, 4
$C_0(\mu g/m^3)$	$1 \times 10^7, 2 \times 10^7, 3 \times 10^7, 4 \times 10^7, 5 \times 10^7$
$D_{m,ref}(m^2/s)$	$0.1 \times 10^{-11}, 2.0 \times 10^{-11}, 4.0 \times 10^{-11}, 6.0 \times 10^{-11}, 8.0 \times 10^{-11}, 10.0 \times 10^{-11}$

기 중 농도변화를 보여주고 있다. 시뮬레이션은 자재온도가 각각 25, 30, 35, 40, 45, 50°C인 경우에 대하여 실시하였다. 자재온도의 변화에 따른 바닥재의 TVOC 방출특성을 살펴보면, 온도가 각각 25, 30, 35, 40, 45, 50°C로 변화하였을 때, 공기 중 TVOC 농도는 증가하는 것을 볼 수 있다.

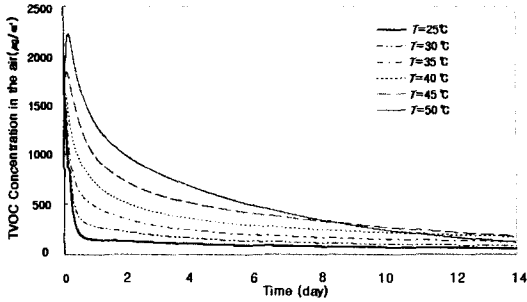


Fig. 9 Influence of temperature on the TVOC concentration in the room.

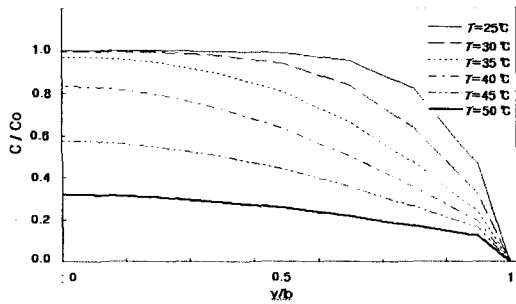


Fig. 10 TVOC concentration in the material after 8 days from the start.

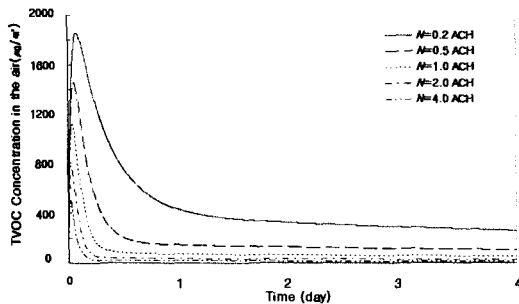


Fig. 11 Influence of ACH on the TVOC concentration in the room.

이는 자재의 온도가 높아짐에 따라 자재 내부의 TVOC 확산속도가 증가하기 때문이다. 그러나 온도가 50°C인 경우 처음에는 온도가 증가함에 따라 실내의 TVOC 농도도 같이 증가하나 8일이 지난 후를 살펴보면, 실내의 TVOC 농도가 빠르게 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 온도가 높을

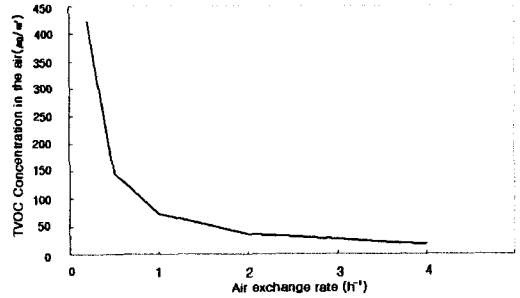


Fig. 12 Influence of ACH on TVOC concentration in the room after 24h from the start.

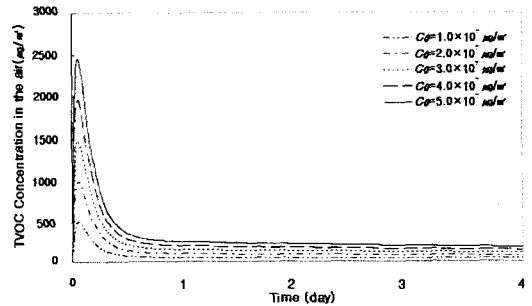


Fig. 13 Influence of initial concentration on the TVOC concentration in the room.

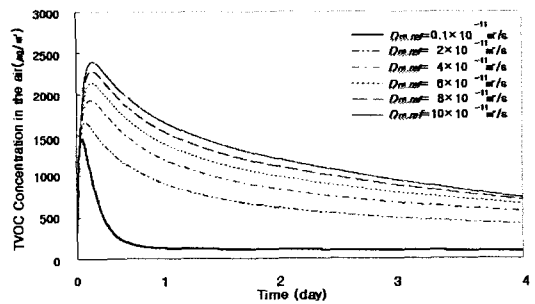


Fig. 14 Influence of internal diffusion coefficient on the TVOC concentration in the room.

수록 자재 내부의 오염물질이 빠르게 공기 중으로 이동하면서 자재 내부에 포함되어 있는 TVOC의 농도가 급격하게 줄어들기 때문인 것으로 파악된다. Fig. 10은 방출 8일째의 온도변화에 따른 자재 내부의 TVOC 농도분포를 나타내고 있다. 온도가 50°C인 경우는 25°C인 경우보다 자재 내부의 TVOC 농도가 거의 1/3 수준에 이르는 것을 확인할 수 있다. 따라서 자재의 온도를 상온으로 유지할 때에 비해 자재의 온도를 인위적으로 높임으로써 자재 내부의 화학물질 함유량을 줄일 수 있으며, 화학물질의 방출속도와 공기 중 화학물질의 농도가 줄어들 것으로 예상된다.

Fig. 11은 환기율의 변화에 따른 TVOC의 공기 중 농도변화를 보여주고 있다. 시뮬레이션은 환기율이 각각 시간당 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 ACH인 경우에 대하여 실시하였다. 환기율의 변화에 따른 바닥재의 TVOC 방출특성을 살펴보면, 환기율이 증가할수록 TVOC의 방출이 방출기간 전반에 걸쳐 감소하는 것을 알 수 있다. 환기는 오염된 실내공기를 상대적으로 오염도가 훨씬 낮은 외부공기로 희석시킴으로써 TVOC의 실내농도를 낮추는 방법이다. 따라서 외부공기를 많이 도입할수록, 즉 환기율이 높을수록 실내 TVOC 농도를 낮추는 효과가 더 커진다고 할 수 있다. 그러나 환기율과 실내 TVOC 농도의 상관관계를 보여주고 있는 Fig. 12를 살펴보면, 환기횟수가 시간당 0~2 ACH까지는 환기횟수가 늘어남에 따라 공기 중 TVOC 실내농도가 400~50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 크게 줄었으나 2~4 ACH 구간에서는 50~20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 변화가 크게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서 환기율 2 ACH 이상에서는 환기율 증가에 따른 공기 중 TVOC의 농도가 크게 감소하지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 바닥재 내부의 초기농도 변화에 따른 TVOC의 공기 중 농도변화를 보여주고 있다. 시뮬레이션은 초기농도가 각각 1×10^7 , 2×10^7 , 3×10^7 , 4×10^7 , $5 \times 10^7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 경우에 대하여 실시하였다. C_0 의 변화에 따른 바닥재의 TVOC 방출특성을 살펴보면, 초기농도의 변화에 따른 실내공기의 TVOC 농도의 변화량이 비례관계에 있음을 알 수 있다. 즉, 초기값을 $3.0 \times 10^7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $1.0 \times 10^7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 1/3 수준으로 감소시키면 공기 중 TVOC 농도도 1/3 수준으로 떨어지는 것을 그래프를 통해 확인할 수 있다. 자재의 초기농도는 자재 내

부에 포함되어 있는 오염물질이 적은 친환경자재를 사용함으로써 줄일 수 있다.

Fig. 14는 바닥재 내부의 확산계수 변화에 따른 TVOC의 공기 중 농도변화를 보여주고 있다. 확산계수는 자재 내부에서 VOCs가 확산, 이동할 때 영향을 미치는 인자로서, $D_{m, ref}$ 값은 재료의 분자구조, 자재온도, 농도 등에 따라 변한다.⁽⁷⁾ 합판의 경우 확산계수는 $0.1 \times 10^{-11} \sim 10.0 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$ 의 범위를 갖는다.⁽⁵⁾ 시뮬레이션은 확산계수가 각각 0.1×10^{-11} , 2.0×10^{-11} , 4.0×10^{-11} , 6.0×10^{-11} , 8.0×10^{-11} , $10.0 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$ 인 경우에 대하여 실시하였다. $D_{m, ref}$ 의 변화에 따른 바닥재의 TVOC 방출특성을 살펴보면, 확산계수가 작을수록 실내공기의 TVOC 농도가 급격히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 확산계수가 작을수록 자재 내부의 오염물질이 천천히 방출하기 때문이다. 반면에 확산계수가 클수록 초기에 빠른 속도로 오염물질을 방출함으로써 후반에는 상대적으로 오염물질을 적게 방출하게 된다. 따라서 장기적인 측면에서는 오히려 확산계수가 작은 경우가 큰 경우보다 실내공기질에 더 큰 영향을 미칠 수 있다.

4. 결 론

온돌마루 바닥재의 VOCs 방출특성 및 실내공기질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 VOCs 방출이론을 바탕으로 시뮬레이션 프로그램을 개발하여, 수치해석에 의한 분석을 실시하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 물질전달이론에 기초하여 VOCs 방출 및 실내농도 예측 프로그램을 작성하였고, 이를 소형 챔버실험을 통해 검증한 결과 타당한 예측이 가능한 것으로 나타났다.
- (2) 자재 내부의 온도가 증가할수록 방출 초기의 공기 중 TVOC 농도는 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구의 시뮬레이션 결과 8일 후에는 자재온도 50°C인 경우 오히려 온도가 증가할수록 실내 TVOC의 농도가 적은 것을 알 수 있다. 이는 온도가 증가할수록 자재 내의 오염물질 확산속도가 증가하여 자재의 오염물질 함유량이 빠르게 감소하기 때문인 것으로 파악된다.
- (3) 환기율이 증가할수록 공기 중 TVOC 농도는 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 환기율이 2 ACH보다 큰 경우, 환기율의 증가에 따른 농도

감소율은 2 ACH보다 작은 경우보다 현저하게 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 별도의 환기장치를 이용하여 환기를 실시하는 경우, 환기율의 증가에 따른 농도감소율을 고려하여 환기장치 설계를 하는 것이 필요하다.

(4) 자재 내부에 포함된 TVOC의 초기농도(C_0)와 공기 중으로 방출되는 TVOC 농도는 선형적인 관계가 있다.

(5) 재료의 구조, 온도, 농도 등의 영향을 받는 확산계수($D_{m,ref}$)가 감소할수록 공기 중 TVOC 농도가 감소하며, 단기적으로는 확산계수가 큰 경우보다 확산계수가 작은 경우가 공기 중 TVOC 농도의 감소가 급격하게 일어나는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 국내주거의 바닥재로 많이 사용되고 있는 합판마루에 대한 시뮬레이션을 실시하여 방출특성에 대해 분석하였다. 이는 국내주거의 일반적인 난방방식인 바닥 난방시스템에 의한 자재온도 변화를 반영하기 위한 기초연구이다. 본 연구는 단일자재인 합판마루에 대한 시뮬레이션을 수행하였고, 싱크는 일어나지 않는 것으로 가정하였다. 그러나 일반적으로 마감자재는 여러 층(예: 접착제 + 합판마루)의 복합자재로 구성되어 있으며, 제2, 제3층의 자재 역시 실내공기질에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한, 온도를 높게 유지시키는 경우 오염물질의 방출량이 급격히 증가하면서 상대적으로 농도가 낮은 자재로 싱크가 일어날 가능성이 커지게 된다. 따라서 실내공기질을 더 정확히 예측하기 해서 복합자재의 영향을 평가하는 연구와 싱크에 관한 연구가 추후 진행될 예정이다.

후 기

본 연구는 환경부 차세대핵심환경기술개발사업

(013-041-03)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Sparks, L. E., Tichenor, B. A., Chang, J. and Guo, Z., 1996, Gas-phase mass transfer model for predicting volatile organic compounds (VOCs) emission rate from indoor pollutant source, *Indoor Air*, Vol. 6, pp. 31-40.
2. Huang, H., 2003, Modeling of volatile organic compounds emissions and sinks from building materials, Ph.D Thesis, The Concordia University, pp. 33-62.
3. Alexy, J. W., 1995, New mass transport elements and components for the NIST IAQ model, National Institute of Standards and Technology, pp. 51-52.
4. Kang, D.-H., 2004, VOCs emission affected by bake-out in floor heated space, Master's thesis, Seoul National University, pp. 23-26.
5. Bodalal, A. S., 1999, Fundamental mass transfer modeling of emission of volatile organic compounds from building materials, Ph.D. Thesis, Carleton University, pp. 71-121.
6. Fujimura, J., 1999, Prediction of VOCs distribution in material and bake-out effect based on micro-macro model, The Conference of Architectural Institute of Japan.
7. Yang, X., 2001, A mass transfer model simulating volatile organic compound emission from 'wet' coating materials applied to absorptive substrates, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 9, pp. 1803-1815.