

수치해석에 의한 바닥난방공간의 온도변화에 따른 VOCs 방출속도 예측

강 동 화, 최 동 희, 김 선 숙, 김 영 돈*, 여 명 석**, 김 광 우***
서울대학교 건축학과 대학원, *(주)하나기연, **서울대학교 건축학과

A Prediction of VOCs Emission Rate with Temperature Variation in Floor Heating Space by Numerical Analysis

Dong-Hwa Kang, Dong-Hee Choi, Sun-Sook Kim,
Young-Don Kim*, Myoung-Souk Yeo**, Kwang-Woo Kim***

Department of Architecture, Graduate School, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea
*Hana Consulting Engineers Co., Seoul 135-929, Korea

**Department of Architecture, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

(Received October 4, 2005; revision received April 12, 2006)

ABSTRACT: The paper deals with the numerical analysis of contaminants emission from the material affected by temperature variation in floor heating system. Considering mass transfer and heat transfer theories, a computer program for the analysis of VOCs emission was made. To demonstrate the accuracy of the numerical solution, the prediction results and the measured data were compared. Using this program, emission rates of the materials in the bake-out space and the no bake-out space were compared to estimate the variation of emission rate.

Key words: Indoor air quality(실내공기질), Volatile organic compounds(휘발성유기화합물), Floor heating(바닥난방), Temperature(온도)

기 호 설 명

A_f : 총발열면적 [m^2]
 C_a : 공기 중 VOCs 농도 [mg/m^3]
 C_{air} : 공기의 비열 [$J/kg\ ^\circ C$]
 C_{as} : 재료 표면의 공기 중 VOCs 농도 [mg/m^3]
 C_m : 재료 내부의 VOCs 농도 [mg/m^3]
 c_p : 벽체재료의 비열 [$J/kg\ ^\circ C$]
 C_{pw} : 물의 비열 [$J/kg\ ^\circ C$]

D_a : 공기 중 VOCs 확산계수 [m^2/s]
 D_m : 재료 내부의 VOCs 확산계수 [m^2/s]
 E : Arrhenius 경험상수 [무차원]
 h_m : 대류물질전달계수 [m/s]
 K_{ma} : 분배계수 [무차원]
 \dot{m}_w : 유량 [kg/s]
 q_h : 바닥, 벽체, 창문의 대류열전달 [W]
 \dot{q} : 발열량 [W]
 Re : Reynolds 수
 $R(t)$: VOCs 방출속도 [$mg/m^2 \cdot h$]
 S : Sutherland 상수 [K]
 Sc : Schmidt 수
 Sh : Sherwood 수

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-7065; fax: +82-2-885-8057

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

T	: 온도 [K]
t	: 시간 [s]
T_m	: 발열층의 평균 온도 [°C]
T_{wi}	: 온수 입구온도 [°C]
V_{room}	: 실의 용적 [m ³]
x	: VOCs 확산방향 길이 [m]

그리스 문자

δx_0	: 발열층의 두께 [m]
ϵ_{PNL}	: 패널의 열교환율 [무차원]
ν	: 공기의 동점성계수 [m ² /s]
ρ	: 벽체재료의 밀도 [kg/m ³]
ρ_{air}	: 공기의 밀도 [kg/m ³]

1. 서 론

건축물의 실내 마감재로부터의 화학물질 방출 현상은 다양한 실내환경조건에 따라 영향을 받으므로, 화학물질의 방출속도 및 실내농도의 평가 시 대상공간의 실내환경조건의 특성이 반영되어야 할 것이다. 특히 온도는 방출현상에 큰 영향을 미치는 인자로서 국내의 경우, 사계절이 뚜렷하여 외기온의 변동이 크고, 난방시스템의 가동에 따라 실온 및 마감재의 온도분포가 다양하게 나타나므로 온도분포와 실내공기질의 상관관계의 파악은 중요한 의미를 갖는다.

이러한 실내공간의 온도변화와 실내공기질의 상관관계와 관련하여, 최근 신축건물의 실내공기질 개선을 위해 시행되고 있는 베이크아웃은 실온 및 자재의 온도를 일반 재실온도분포에 비해 큰 폭으로 변화시키므로 온도와 실내공기질의 관계에 대한 연구가 더욱 필요하다. 베이크아웃(bake-out)은 방출현상의 온도의존성을 활용한 것으로 온도 상승을 통해 자재 내부의 화학물질 함유량을 줄여 자재를 인위적으로 노후화시키는 효과를 얻고자 하는 개선방법의 하나이다.

그러나 기존의 베이크아웃 연구에서 유효한 효과⁽⁸⁾뿐 아니라 부정적 또는 불확실한 결과^(2,5) 또한 나타나고 있으며, 이러한 점은 일반 재실온도와는 다른 높은 온도분포에서의 화학물질 방출현상에 대한 총체적인 연구의 부족 때문으로 판단된다. 실내공기질 개선을 위한 실질적인 베이크아웃의 적용을 위해서는 온도변화에 따른 자재의

화학물질 방출속도의 변화, 베이크아웃 중의 흡탈착 현상, 플러시아웃(flush out)의 병행 등에 대한 총체적인 연구가 진행되어야 할 필요가 있다. 이중 온도변화에 따른 화학물질 방출속도의 변화는 베이크아웃 시행의 잠재적 가능성과 관련된 것으로 우선적으로 연구가 진행되어야 할 부분이다.

본 연구는 온도변화에 따른 자재의 화학물질 방출속도변화를 예측하여 베이크아웃 시행의 잠재적 효과를 파악하는 것을 목적으로 한다. 베이크아웃 시행시에는 온도변화가 매우 다양하고 연속적으로 나타나므로, 실험뿐만 아니라 수치해석을 수행함으로써 보다 효과적인 분석이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 국내 공동주택에서 일반적인 바닥난방공간을 대상으로 베이크아웃 시행에 의한 온도변화 및 온도분포에 따른 화학물질 방출해석을 위한 적합한 해석이론을 고찰, 선정하여 전열 및 물질전달 해석이 동시에 가능한 프로그램을 작성하였다. 해석 프로그램을 활용하여 온도변화에 따른 시뮬레이션을 수행하였으며, 화학물질 방출속도의 변화를 분석하였다.

2. 온도변화에 따른 VOCs 방출

온도변화는 자재로부터의 VOCs 방출속도의 변화를 일으킨다. 주로 국외를 중심으로 온도변화에 따른 방출속도변화의 측정 및 시뮬레이션 예측이 수행된 바 있으며, 이에 대한 예비적 고찰을 수행하였다. 국외를 중심으로 진행되어온 온도변화에 따른 VOCs 방출속도변화에 관한 연구 내용을 살펴보면 다음과 같다.

Renta⁽⁶⁾는 자재의 온도를 23°C, 29°C, 50°C로 변화시키며 TVOC의 방출속도를 측정하였으며, 그 결과 50°C에서의 방출속도가 23°C에서의 방출속도의 수십배에 이르는 것으로 측정되었다. Ishihara⁽³⁾는 베이크아웃용 챔버를 제작하여 자재의 베이크아웃 시행 후의 챔버 내 농도가 30~40% 감소하였음을 밝혔다. 그러나 이러한 측정연구들은 실제공간의 다양한 온도변화에 대한 결과를 제시하지 못하여 활용성이 떨어진다는 단점이 있다.

Fujimura⁽¹⁾는 물리적 모델을 활용하여 베이크아웃의 효과에 대한 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 자재온도를 10°C에서 30°C로 베이크아웃을 1일 수행한 후 자재의 온도가 다시 10°C로 복귀하였을 경우의 실내공기농도의 저감효과를 수치해

석하여 약 25% 저감을 예측하였다. Yang⁽¹²⁾은 카페트의 온도변화에 따른 VOCs 방출 데이터를 예측하기 위한 물리적 모델을 활용한 시뮬레이션을 수행하여 베이크아웃의 가능성을 연구하였다. 이상의 연구들은 수치해석을 통해 특정온도에서의 화학물질 방출속도를 예측할 수 있으나 온도를 정적으로 해석하고 있으며, 따라서 실제공간의 동적인 온도변화에 의한 방출속도 해석은 불가능하다.

바닥난방 공간에서의 베이크아웃 시행시에는 온도변화가 다양하고 연속적으로 나타나므로 전열 해석이 동시에 이루어진다면, 실질적인 공간의 온도변화에 따른 방출속도의 해석이 가능할 것으로 판단된다. 이와 같은 온도변화에 따른 화학물질 방출을 해석하기 위하여 주요 핵심이론을 검토하여 본 연구에 적합한 이론을 적용하였다.

Yang⁽¹²⁾은 온도변화에 따른 자재 내부의 화학물질 확산계수의 변화를 Arrhenius형 방정식으로 해석하였으나 이러한 해석방법은 입력 데이터의 부족으로 실질적인 활용이 어렵다. Fujimura⁽¹⁾는 이와 유사한 Arrhenius형 경험식을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 입력계수를 방출 데이터로부터 경험적으로 획득하므로 활용이 용이한 장점이 있다. 분배계수와 관련하여 Yang⁽¹²⁾은 자재 표면에서의 분배계수의 온도의존성에 관한 식을 제안하였다. 그러나 Yang은 분배계수는 방출 초기에만 영향을 주며 일정시간 경과 후 영향력이 미미함을 밝혔고, 특히 건자재(dry material)의 경우 영향은 더욱 적다고 하였다.

따라서 본 연구에서는 활용의 용이성을 고려하여 Arrhenius형 경험식을 채택하여 온도변화에 따른 확산계수를 계산하고, 분배계수의 온도의존성 관련식은 고려하지 않았다.

3. 해석 프로그램

건축자재의 VOCs 방출 해석을 위하여 타당한 해석이론을 적용하여 방출 모델을 작성하였으며, 바닥난방에 의한 온도변화를 반영하기 위하여 온수 바닥난방 공간의 전열해석이론을 바탕으로 해석 프로그램을 작성하였다. 시간에 따른 온도와 VOCs 농도의 변화를 고려하여 비정상상태 해석을 수행하였으며, 유한차분법을 기본으로 하여 단위공간의 해석이 이루어졌다.

3.1 프로그램의 해석이론 및 구조

3.1.1 전열이론

온수 바닥난방에 의한 실내 온도분포를 해석하기 위하여 온돌 구조체, 벽체, 실내공기의 열전달에 관한 전열이론^(4,11)이 적용되었다. 온돌 구조체의 해석은 기존의 연구에서 타당성이 검증된 fin 효율과 Effectiveness-NTU(number of transfer unit)를 이용한 동적 1차원 해석방법을 적용하였으며, 벽체의 열전달은 단방향으로 일어나며 실내공기의 온도분포는 균일한 것으로 가정하였다. 프로그램에 적용된 전열이론은 다음과 같다.

온돌 구조체

$$\dot{q} \cdot A_f \cdot \delta x_o = \epsilon_{PNL} \dot{m}_w C_{pw} (T_{wi} - T_m) \quad (1)$$

벽체 및 바닥 구조체

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

실내공기

$$\rho_{air} \cdot C_{air} \cdot V_{room} \frac{\partial T_{room}}{\partial t} = \sum q_h + q_{infil} + q_{supply} \quad (3)$$

3.1.2 물질전달이론^(1,7,9,11)

자재 내부에서는 1차원 확산이 일어나는 것으로 가정하고, 화학물질의 농도가 초기에 균일하게 분포하는 것으로 가정하였다. 또한 공기영역의 농도는 완전혼합을 가정하였다. 경계조건 및 초기조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Boundary and initial condition

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

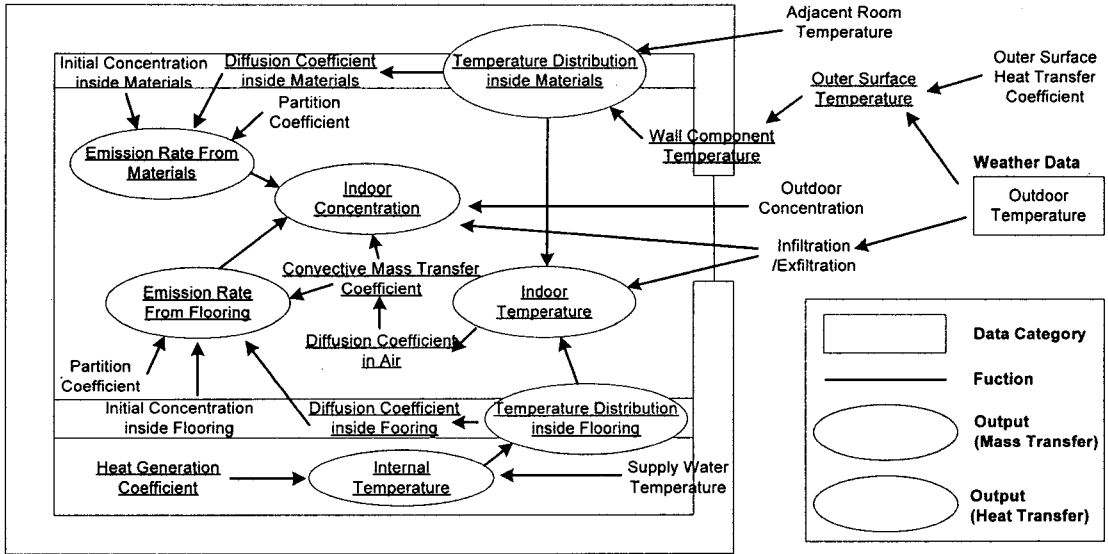


Fig. 1 Data flow structure.

자재 내부

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_m \frac{\partial C_m}{\partial x} \right) = \frac{\partial C_m}{\partial t} \quad (4)$$

자재 표면

$$C_{as} = K_{ma} C_m \quad (5)$$

경계층

$$R(t) = h_m (C_{as} - C_a) \quad (6)$$

$$Sh = \frac{h_m l}{D_a} \quad (7)$$

$$Re_l = \frac{vl}{\nu} \quad (8)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_a} \quad (9)$$

$$Sh = 0.664 Sc^{1/3} Re_l^{1/2} \quad (10)$$

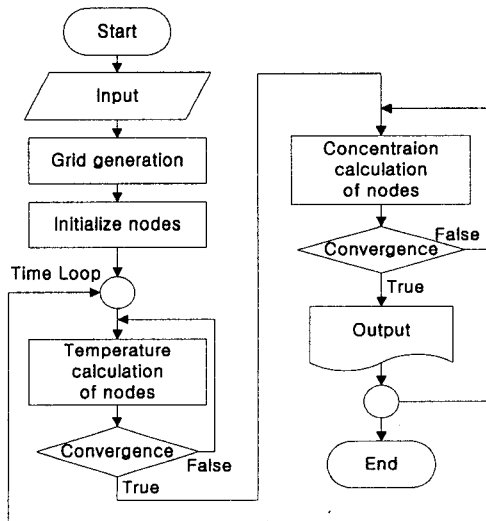


Fig. 2 Program flow chart.

실내공기

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} = NC_{in} - NC_{out} - \frac{A}{V_{room}} D_m \frac{\partial C_m}{\partial x} \quad (11)$$

3.1.3 온도의존성 이론

자재에서 방출되는 화학물질은 자재의 온도, 실내공기의 온도에 따라 방출량이 변화하게 된다. 이와 같은 물질전달현상의 온도의존성을 해석하기 위하여 적용된 이론은 다음과 같다. 수분의 물질전달현상과 달리 화학물질의 전달현상에서 물질전달량은 적으므로 물질전달에 의한 열전달은 무시하였다.⁽¹²⁾

자재 내부

$$D_m(T) = D_{m,ref} \exp\left(-E\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{296}\right)\right) \quad (12)$$

실내공기

$$D_a = 5.398 \times 10^{-6} \left(\frac{T}{296}\right)^{1.5} \quad (13)$$

식(1)~(11)의 지배방정식들을 Table 1의 초기 조건 및 경계조건과 함께 유한차분법을 적용하여 수치해석을 수행하였다. Gauss-Seidel 반복법을 사용하였으며, 시간의 이산화는 안정된 해를 보장하는 암시적 기법(implicit scheme)을 적용하였다. 해석 시간간격은 1분으로 설정하였으며, 각 벽체 별로 14~32개의 노드를 할당하고 화학물질 방출 자재에 대해서는 10여개의 노드를 할당하였다. 수치해석은 물질전달, 전열, 온도의존성 이론을 동시에 해석하여 이루어지며, 물질전달 해석은 다양한 벽체 구성재료 중 바닥마감재에 대하여 수행되었고, 전열해석은 구성벽체 모두에 대하여 수행하였다.

3.2 자재의 VOCs 방출계수의 획득

자재의 VOCs 방출을 시뮬레이션하기 위하여 C_0 , D_m , K_{ma} 와 같은 방출과 관련한 계수들의 값이 필요하며 계수값의 획득을 위해서는 직접측정법 및 Curve-fitting 추정법⁽⁷⁾이 활용될 수 있다. Bodalal⁽¹⁰⁾은 직접측정법을 이용한 계수추정법을 제안하였으나 현재로서는 오차가 크고 비용이 많이 드는 단점이 있음을 지적하였다. 이에 비해 Curve-fitting 추정법은 각 계수들의 방출곡선에 미치는 영향을 고려하여 챔버측정실험 결과와 예측값이 일치하도록 최적값을 추정하는 방법

Table 2 Chamber operating condition⁽⁷⁾

Test sample	Laminate flooring (PB substrate)
Size of the sample	0.5×0.2 m ²
Temperature	23°C, 29°C, 50°C
Air exchange rate	0.5 ACH
Testing time	1~7 days (23°C, 29°C) 1~20 days (50°C)

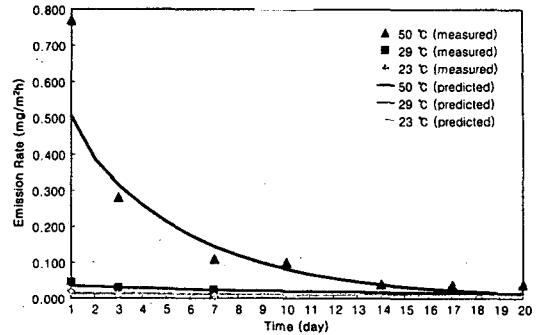


Fig. 3 Comparison of the measured and predicted TVOC emission rate from the laminate flooring.

으로 직접측정법에 비해 손쉽게 계수를 획득할 수 있으며, 본 연구에서는 Curve-fitting 추정법을 활용하여 계수를 획득하였다.

Renta⁽⁶⁾가 수행한 온도변화에 따른 강화마루로부터 방출되는 TVOC 방출속도 측정에 관한 소형 챔버 실험결과를 바탕으로 Curve-fitting을 수행하였다. Renta는 온도변화에 따른 강화마루의 TVOC 방출속도를 구하기 위하여 23°C, 29°C, 50°C의 온도에서 소형 챔버 실험을 수행하였다. 실험의 조건은 Table 2와 같으며, 실험결과는 Fig. 3에 시뮬레이션 결과와 함께 나타내었다. Curve-fitting을 수행하여 자재 내부의 초기 농도 및 TVOC 확산계수를 획득하고 분배계수(K_{ma})⁽¹⁰⁾ 및 공기 중 확산계수(D_a)⁽¹¹⁾는 문헌값을 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 계수들은 Table 3과 같다.

3.3 온도변화에 따른 해석 프로그램의 시뮬레이션 수행 결과

23°C와 50°C에서의 측정값과 시뮬레이션 예측값의 Curve-fitting을 통해 획득한 확산계수를 식(16)에 대입하여 아레니우스 경험수(E)를 20,020으로 산출하였다. 23°C, 29°C, 50°C에서의 TVOC 방출속도를 예측하기 위하여 Table 3의 입력값을

Table 3 Properties of TVOC used in the emission simulation of the laminate flooring

Parameter	Value	Parameter	Value
D_m (m ² /s)	2.8×10^{-13}	D_a (m ² /s)	7.57×10^{-6}
C_0 (mg/m ³)	1.0×10^4	K_{ma}	3289

활용하였으며, 확산계수 D_m 은 아레니우스 경험수를 반영하여 온도의존성식에 따라 온도변화에 따른 확산계수의 변화를 고려하였다. 시뮬레이션 결과 Fig. 3과 같이 23°C, 29°C, 50°C에서의 측정값과 시뮬레이션 예측값이 비교적 잘 일치하였다.

4. 바닥난방 공간의 베이크아웃

입주 전 실내공기질 개선방안으로 베이크아웃을 수행함을 가정하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 입주 후 TVOC 방출속도의 저감률을 분석하였다. 모델링 대상공간을 Fig. 4와 같이 3×3×2.2m의 크기의 단위공간으로 설정하였다. 이 단위공간에는 온수바닥난방 시스템이 적용되어 베이크아웃 또는 난방시에 해당공간에 열량을 공급하는 것으로 설정하였다.

해석대상 공간에는 앞서 프로그램 검증시 사용하였던 강화마루만이 바닥에 시공된 것으로 가정하였다. Fig. 1과 같이 외기온 변동 및 바닥난방 시스템의 가동에 따라 구조체를 통한 열전달, 침기에 의한 열전달이 함께 고려되어 해석공간의 부위별 온도, 강화마루의 온도, 실내의 온도가 함께 계산되고 온도의존성 이론에 따라 온도변화에 따른 TVOC 방출량이 해석되었다.

시뮬레이션 케이스를 Table 4와 같이 해석기간, 베이크아웃 온도, 기간에 따라 구분하였다. 이

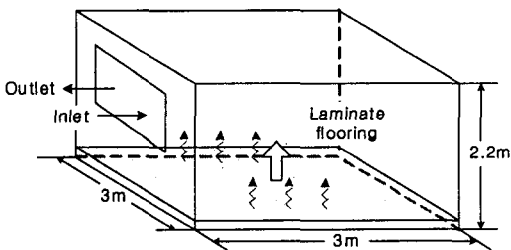


Fig. 4 Model space for the analysis.

Table 4 Simulation case

Simulation case	Simulation period	Bake-out temp.	Bake-out period
Case A	Winter (Jan.3~Feb.8)	40°C	7 days
Case B		No Bake-out	
Case C	Summer (Aug.1~Aug.15)	40°C	7 days
Case D		No Bake-out	

때 모든 해석 케이스에 0.5 ACH의 일정한 외기 도입률을 적용하였다.

Case A는 동계의 베이크아웃을 가정한 경우로 7일간 실온이 40°C에서 제어되도록 설정하고 Case B는 자연상태를 유지하는 것으로 설정하였다. 베이크아웃 종료 1일 후에는 Case A, B 모두 재실자가 입주하는 것으로 가정하여 22°C로 실온이 유지되는 것으로 설정되었다.

Case C는 하계의 베이크아웃을 가정한 경우로 동계와 마찬가지로 7일간 40°C의 실온을 유지하도록 설정되었고, Case D는 자연상태를 유지하는 것으로 설정하였다. 베이크아웃 종료 1일 후에는 Case C, D 모두 재실온도 26°C로 유지되도록 설정하였으며, 이때에는 에어컨을 가동하여 실온이 유지되도록 설정되었다.

이러한 시뮬레이션 케이스 구분을 통해 베이크아웃을 시행한 공간과 시행하지 않은 공간에 대한 TVOC 방출속도의 비교를 통해 베이크아웃 시행시 자재의 방출속도 저감효과를 분석하고자 하였다.

외기온은 벽체를 통한 열관류 및 침기에 의해 실내공간의 온도분포에 큰 영향을 미치는 요인이므로 설비공학회 기상데이터 파일의 외기온값을 프로그램 입력값으로 활용하여 동·하계별 시뮬레이션을 실시하였다. 입주 직전에는 베이크아웃 시행공간과 미시행공간 모두 동일한 재실온도를 유지하는 것으로 가정하였다.

4.1 동계 베이크아웃 시뮬레이션 결과 및 고찰

동계에 베이크아웃을 시행한 공간(Case A)의 경우 Fig. 5에서와 같이 입주 전의 기간에는 36~39°C의 실온을 유지하였으며, 베이크아웃을 시행

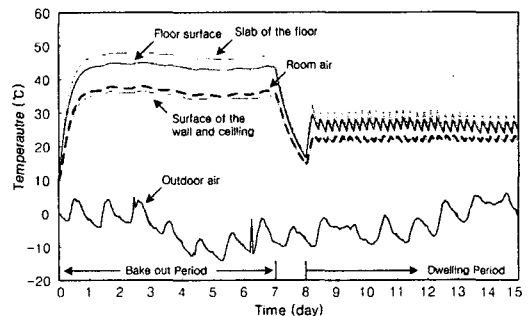


Fig. 5 Temperature profile (Case A).

하지 않은 공간(Case B)의 경우에는 Fig. 6과 같이 5~10℃ 가량의 실온을 유지하였다. Case A의 경우 설정실온을 40℃로 설정하였으나 낮은 외기온으로 인한 열손실이 크게 일어나 실온이 설정온도에 1~3℃ 가량 미치지 못하였다. 그러나 바닥에 설치된 강화마루의 경우 온도가 45℃ 가량으로 높게 유지되었다.

Case A와 B의 입주전 기간의 온도차로 인하여 Fig. 7에서 보는 것과 같이 TVOC의 방출속도의 차이가 크게 발생하였다. 베이킹아웃을 시행하지 않은 Case B의 경우 10℃ 이하의 낮은 실온으로 인하여 방출이 거의 일어나지 않은 반면, 베이킹아웃을 시행한 Case A의 경우 방출속도가 매우 높게 나타났다.

입주 후(8일 이후)에는 입주자 재실을 가정하여 Case A와 B 모두 실온이 22℃로 유지되도록 하였다. 이때 베이킹아웃을 하지 않은 경우(Case B)의 TVOC 방출속도가 베이킹아웃을 수행한 경우(Case A)보다 높게 나타났는데 이는 입주 전 기간의 베이킹아웃시 높은 TVOC 방출로 인해 자재

내부의 TVOC 농도가 크게 줄었기 때문이다. 입주 1일 후를 기준으로 Case A 공간바닥재의 TVOC 방출속도는 0.005 mg/m²h, Case B는 0.026 mg/m²h 로써 베이킹아웃 미시행공간 대비 시행공간에서의 바닥마감재로부터 TVOC 방출속도는 약 80% 가량 줄어들었다.

4.2 하계 베이킹아웃 시뮬레이션 결과 및 고찰

하계에 베이킹아웃을 시행한 공간(Case C)의 경우 Fig. 8과 같이 입주 전의 베이킹아웃 시행에 따

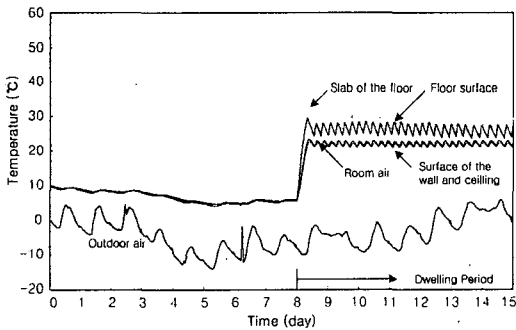


Fig. 6 Temperature profile (Case B).

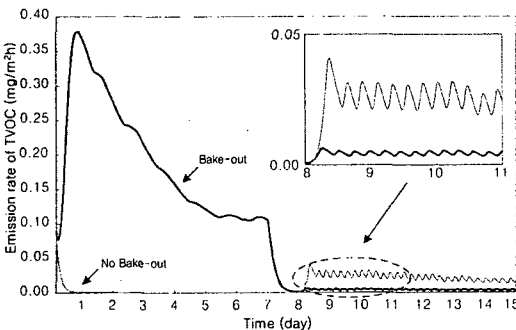


Fig. 7 TVOC Emission rate of the floor material (Winter).

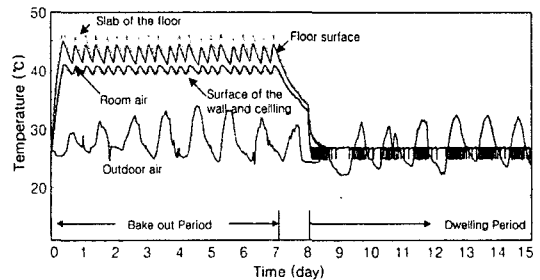


Fig. 8 Temperature profile (Case C).

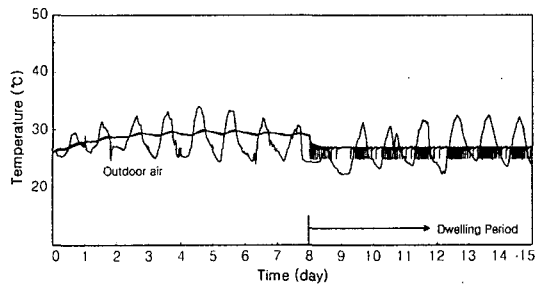


Fig. 9 Temperature profile (Case D).

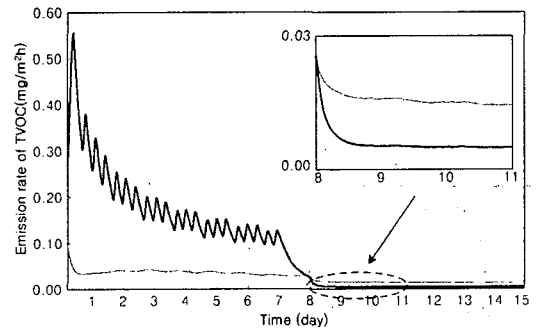


Fig. 10 TVOC Emission rate of the floor material (Summer).

라 실온이 설정온도인 40℃를 유지하였다. 이때 바닥의 강화마루의 온도는 42~47℃를 나타내었다. 한편 베이크아웃을 시행하지 않은 공간(Case B)의 경우는 30℃를 웃도는 외기온으로 인해 실온이 25~29℃의 분포를 나타내었다.

입주 전의 베이크아웃 시행 유무에 따라 다른 온도분포가 나타났으며, 이로 인해 Fig. 10에서 보는 것과 같이 Case C의 TVOC 방출속도가 Case D에 비해 매우 높게 나타났다.

입주 후(8일 이후)에는 입주자의 재실을 가정하여 Case C와 D의 실온을 26℃로 유지되도록 하였다. 이때의 TVOC 방출속도는 입주전 시기에 베이크아웃을 수행한 Case C가 Case D보다 낮았으며, 이 역시 베이크아웃 시행으로 인하여 자재 내부의 TVOC 농도가 크게 줄어들었기 때문이다. 입주 1일 후를 기준으로 Case C 공간바닥재의 TVOC 방출속도는 0.005 mg/m²h, Case B는 0.016 mg/m²h로써, 베이크아웃 미시행공간 대비 시행공간에서의 바닥마감재로부터 TVOC 방출속도는 약 76% 줄어들었다.

실제 베이크아웃 시행시의 실내 화학물질농도는 방출속도뿐만 아니라 흡탈착 현상, 플러쉬아웃 병행 여부, 복합자재의 영향 등 여러 가지 인자에 의해 영향을 받으므로 본 연구에서 나타난 방출속도의 저감결과만으로는 직접적으로 해당공간의 TVOC 농도가 저감될 것으로 판단하기 어렵다. 그러나 이러한 방출속도의 저감은 다른 여러 가지 영향요소들을 효과적으로 제어하며 베이크아웃을 시행한다면 실내공기질을 개선할 수 있는 잠재적 가능성이 있음을 의미하는 것이다.

한편 온도분포 해석결과는 바닥난방공간에서 바닥재의 온도가 다른 부위의 온도보다 높음을 보여주며 이를 통해 바닥재의 베이크아웃 시행효과가 더욱 좋을 것임을 예상할 수 있다. 최근 바닥마감재로 화학물질의 포함량이 높은 가공 목질재료를 주로 사용하는 것을 고려하면 바닥난방공간의 베이크아웃 시행 가능성은 더욱 높다고 할 수 있다.

4.3 확산속도의 온도의존성에 따른 방출속도 저감률

자재 및 화학물질에 따라 방출속도의 변화에 큰 영향을 주는 온도의존성은 차이가 있으며, 베이크아웃 시행 후의 화학물질 방출속도의 변화에도

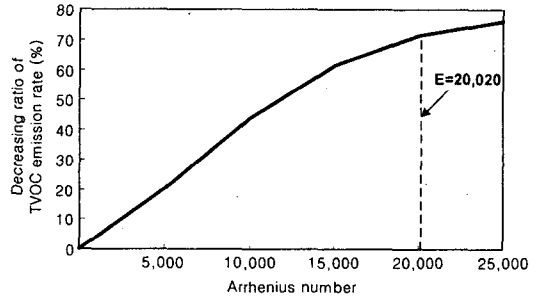


Fig. 11 Decreasing ratio of TVOC emission rate with Arrhenius number.

큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 온도의존성의 변화에 따른 베이크아웃 시행 후의 방출속도의 변화를 시뮬레이션하여 앞서의 연구에 사용된 자재와 다른 자재가 사용되었을 경우의 방출속도 변화율을 평가하였다.

아레니우스 경험수의 값에 따른 TVOC 방출속도의 저감률을 나타낸 것은 Fig. 11과 같다. 베이크아웃이 40℃의 온도로 7일간 수행되었으며, 종료 후에는 23℃로 유지되는 것으로 하나의 케이스를 설정하고 23℃로 온도가 계속 유지된 케이스와의 방출속도 비교를 수행하였다.

아레니우스 수의 증가에 따라 TVOC 방출속도의 저감률도 선형적으로 증가하며, 베이크아웃의 시행시 자재의 화학물질 방출속도의 저감효과는 자재의 화학물질 확산속도의 온도의존성에 크게 좌우됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 온도변화를 고려한 VOCs 방출속도의 변화를 예측하여 베이크아웃 시행시 VOCs 방출속도 저감 가능성을 판단하는 것을 목적으로 한다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 바닥난방공간의 자재 및 실온 분포의 해석 및 온도변화에 따른 VOCs 방출 해석 프로그램을 작성하였으며, 동일한 VOCs 방출계수를 활용한 온도변화에 따른 방출속도의 예측값이 실측값과 비교적 정확히 일치하였다.

(2) 동계의 베이크아웃 시행시 발생하는 온도변화에 따른 TVOC 방출속도를 파악하기 위하여, 40℃의 실온을 7일간 유지한 경우(Case A)와 베이크아웃을 시행하지 않은 경우(Case B)의 시

플레이션 예측값을 비교하였으며, 베이크아웃 시행에 따라 자재의 TVOC 방출속도가 80% 가량 저감된 것으로 예측되었다.

(3) 하계의 베이크아웃 시행시 발생하는 온도 변화에 따른 TVOC 방출속도를 파악하기 위하여, 40℃의 실온을 7일간 유지한 경우(Case C)와 베이크아웃을 시행하지 않은 경우(Case D)의 시 플레이션 예측값을 비교하였으며, 베이크아웃 시행에 따라 자재의 TVOC 방출속도가 76% 가량 저감된 것으로 예측되었다.

(4) 자재에 따라 화학물질 확산속도의 온도의존성은 다르며, 베이크아웃 시행시 자재에서 방출되는 화학물질의 방출속도 저감은 온도의존성에 따라 크게 좌우된다.

본 연구의 결과 건축자재의 온도변화를 통해 화학물질의 방출속도를 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 향후 베이크아웃 시행시 실내농도의 저감을 위해서는 방출속도 이외에 실내 화학물질농도에 영향을 줄 수 있는 현상에 대한 연구가 필요하며, 이와 관련하여 흡탈착 현상, 플러쉬아웃의 병행 및 복합자재의 영향 등에 대한 추가적인 연구를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 환경부 2004년도 차세대 핵심환경기술개발사업(013-041-035)의 일환으로 서울대학교 공학연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Fujimura, J., 2001, Modelling of mass diffusion in porous solids and prediction of indoor VOCs concentration based on macroscopic model, *Journal of AIJ*, No.542, pp. 57-61.
2. Girman, J. R., Alevantis, L. L. E. and Webber, L. M., 1989, The bake-out of an office building: A case study, *Environment International*, Vol. 15, pp. 449-453.
3. Ishihara, O. and Noda, K., 2003, Reduction effect on chemical substances contained in construction materials using bake-out, *Journal of AIJ*, No. 564, pp. 49-54.
4. Kim, Y. Y., 1999, A study on applicability of the time-division hotwater supply heating using the thermal characteristics of Ondol, *Journal of AIK*, Vol. 15, No. 10, pp. 187-195.
5. Offerman, F. J., Loisselle, S. A. and Lau, H., 1993, Indoor contaminant emission rate before and after a building bake-out, 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 6, pp. 687-692.
6. Renta, W., 2002, The effect of temperature on the emission of formaldehyde and VOCs from laminate flooring-case study, *Building and Environment*, Vol. 37, pp. 41-44.
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.
8. Park, H. W., Kang, D. H., Lee, G. D., Park, Y. S., Yeo, M. S. and Kim, K. W., 2005, Experimental study on the effect of ventilation on indoor air quality in baking out, 2005 AIK Conference, Vol. 25, No. 1, pp. 399-403.
9. Clark, M. M., 1996, *Transport Modeling for Environmental Engineers and Scientists*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
10. Bodalal, A. S., 1999, *Fundamental Mass Transfer Modeling of Emission of Volatile Organic Compounds from Building Materials*, Ph.D Thesis, Carleton University, Canada.
11. Kim, Y. Y., 1997, *A Study on the Time-Division Hot Water Supply for Energy Saving of Radiant Floor Heating System*, MS Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
12. Yang, X., 1999, *Study of Building Material Emissions and Indoor Air Quality*, Ph.D Thesis, MIT, USA.