

휘발성 유기화합물의 거동특성 예측을 위한 수학적 모델링 및 실내 환기특성 연구

이 승 철, 최 청 렬^{*}, 김 창 녕^{**}

한양대학교 기계기술연구소, ^{*}경희대학교 대학원 기계공학과, ^{**}경희대학교 기계·산업시스템공학부

Mathematical Modeling and Analysis on the Behavior of VOC in an Indoor Environment

Seung-Chul Lee, Choeng-Ryul Choi^{*}, Chang-Nyung Kim^{**}

Mechanical Engineering and Technology Research Institute of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

**Mechanical Engineering Department, Graduate School, Kyunghee University, Suwon 449-701, Korea*

***College of Mechanical & Industrial System Engineering, Kyunghee University, Suwon 449-701, Korea*

(Received April 12, 2001; revision received May 8, 2001)

ABSTRACT: This paper presents a numerical analysis of the emission process of volatile organic compound (VOC) from building material and its diffusion in a room. A polypropylene styrene-butadiene rubber (SBR) floor plate is chosen as the emission source of VOC. This study investigates spatial concentration distributions and time history of room-averaged VOC concentration for both with and without flushing. The results of this study show that for calculation based on ten-days period the room averaged VOC concentrations with and without flushing are quite different. The results thus suggest the need of flushing for new buildings.

Key words: Volatile organic compound(VOC : 휘발성 유기화합물), Emission process(방출과정), Styrene-butadiene rubber(스티렌-부타디엔 고무), Indoor air quality(IAQ : 실내 공기 질)

기 호 설 명

그 리 스 문 자

C : 등가 공기농도 [kg/kg]
 D : 확산계수 [m^2/s]
 L : 특성길이 [m]
 t : 시간 [sec]
 u : x 방향 속도 [m/s]
 v : y 방향 속도 [m/s]

ρ : 밀도 [kg/m^3]
 k : 난류운동에너지 [m^2/s^2]
 ϵ : 난류운동에너지소산율 [m^2/s^2]
 μ : 층류점성계수 [$kg/m \cdot s$]
 ν : 층류동점성계수 [m^2/s]

하첨자

† Corresponding author

Tel.: +82-31-202-9715; fax: +82-31-202-8106

E-mail address: crchoi@cvs2.kyunghee.ac.kr

$w.s. +$: VOC 소스영역에서의 경계면

$w.s. -$: 공기영역에서의 경계면

1. 서 론

휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds : 이하 VOC 혹은 VOCs라 칭함)은 탄화수소 화합물의 총칭으로 오존 등 광화학스모그 원인물질, 대기 중의 악취물질일 뿐만 아니라 환경 및 건강에 영향을 초래하여 VOC의 감축을 대기 질 관리의 주요 정책의 목표로 하는 국가가 증가하는 추세이다. 이미 OECD 가입국인 미국, 유럽의 선진국들은 엄격한 VOC 규제 방침⁽¹⁻³⁾을 시행하고 있으며 VOC의 배출현황, 물질거동 및 억제방안에 대해 활발한 연구활동이 진행 중에 있다. 최근 국내에서도 환경부의 VOC 규제관리정책⁽⁴⁾에 따라 이에 대응하는 VOC 배출현황, 거동 및 억제방안에 대한 연구가 시작되고 있으나, 미국 등의 선진국들에 비해서는 미비한 실정이다.

VOC 물질은 산업체 작업공간뿐만 아니라 건축물에 사용되는 건축재료들로부터 실내로 방출된다. 실내에서 발생하는 VOC는 실내 공기의 질(Indoor Air Quality)을 저하시키고, 재실자의 인체에 유해한 영향을 미치는 실내 환경오염의 주된 요인이 되고 있다. 최근 VOC 물질을 제거하기 위해 특수 환기장치나 VOC 억제장치를 설치하고는 있지만 건물 내에서의 VOC 물질의 대류 및 확산에 대한 선행연구가 이루어지지 않아 적절한 실효성을 거두지 못하고 있다. 또한, VOC의 빠른 제거를 위해 실내로 공급되는 공기의 온도를 일정 시간 높여 주거나 공기의 양을 증가시키는 flushing⁽⁵⁾을 도입하기도 하지만 이에 대한 연구가 미흡한 실정이다. VOC 물질의 효과적인 제거를 위해서는 실내에서의 VOC의 방출량과 VOC의 거동 해석이 필수적이며, 이에 앞서 VOC 방출과정에 대한 모델링 개발이 선행되어야 한다.

최근 국제적으로 VOC 방출과정을 해석하기 위한 모델 개발이 큰 관심의 대상이 되고 있는데, 이들은 경험적 모델과 물리적 모델로 구분될 수 있다. 경험적 모델은 주로 시간의 함수로 표현되는 실험 농도치에 관한 적절한 수학적 표현식을 모색하는 방식이다. 이 모델은 수식의 계수들이 범용성을 가지지 못하며, 각각의 경우에 따라 실험적으로 구해져야 한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 계수들은 물리적 의미를 갖지 않는다. 하지만 최근 Fick의 확산식에 기반을 둔 물리적 모델이 Guo and Tichenor⁽⁶⁾에 의해 개발

되었으며, 이 모델은 경험적 모델보다 실험결과를 더욱 정확하게 모사하고 있다. 그러나 이 모델 역시 데이터 적합곡선(data-fitting)을 통하여 경계층의 두께가 구해져야 한다는 결점이 있다. 또한 Sparks et al.⁽⁷⁾과 Guo et al.^(8,9)에 의하여 주위의 유체유동 조건에 바탕을 둔 기체상의 물질전달을 평가하는 방법이 제시된 바 있다. 이 방법은 실험 데이터 없이 사용 가능하지만 1차원적인 경계층 문제로 제한되기 때문에 실제적으로 사용하기에는 어려운 점이 많다.

본 연구에서는 실내 건축재료에 함유된 VOC가 공기 중에 방출되는 과정을 모델링하고, 동일한 공기유량이 실내로 공급되는 경우에 대하여 일정 시간 동안 유량을 증가 또는 감소시키는 flushing의 유·무와 flushing 시간의 변화에 따른 VOC의 대류 및 확산 특성을 전산유체역학 기법을 도입하여 해석하고자 한다. 또한 이것이 VOC 잔존량에 미치는 영향에 대해서도 살펴보고자 한다.

2. 모델 선정

본 연구에서 채택한 실내 공간에 대한 치수와 함께 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실내 공간은 폭 4.5m, 높이 3.0m이며, 유입구와 유출구의 크기는 0.02m로 동일하다. 또한 그림에서 음영으로 표시된 부분은 VOC의 소스가 존재하는 부분으로 편의상 VOC 소스영역이라 칭하기로 하며, 두께는 0.005m이다. 이를 제외한 나머지 영역은 공기영역이라 칭하기로 한다. 본 연구에서 채택한 VOC 소스영역은 스티렌-부타디엔 고무(Styrene-Butadiene Rubber : 이하 SBR이라 칭함)로 이루어

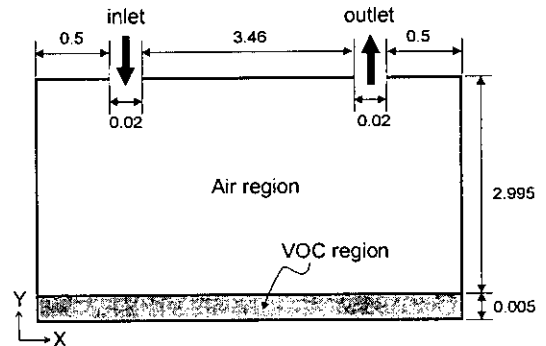


Fig. 1 Room model analyzed (unit : m).

Table 1 Details of computational cases

Case	Flushing	Flushing time		
		0~8 h	8~16 h	16~24 h
Case 1	no	-		
Case 2	yes	○	×	×
Case 3	yes	×	○	×
Case 4	yes	×	×	○

○ increased air supply ; × decreased air supply.

어져 있으며, 이는 카페트 패드나 매트 등의 가정용 제품에 주로 사용된다.

본 연구에서는 flushing 유·무와 flushing 시간의 변화에 따라 총 네 가지의 경우에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 모든 경우에서 10일 동안 실내로 공급되는 공기의 총유입량은 동일하다. 각각의 계산경우에 대한 상세를 Table 1과 Fig. 2에 나타내었다. 표와 그림에서 보이는 바와 같이 flushing이 있는 경우, 하루 중 8시간 동안 공기의 공급량을 증가되고 16시간은 감소되는 것으로 하였다. 이것은 1일을 주기로 하여 10일 동안 반복된다. 또한 그림에서 점으로 표시된 10일 기점은 향후 결과논의를 위한 것이다.

3. VOC 방출 모델링

본 연구에서 선택한 2차원 해석모델에서 사용되는 지배방정식은 VOC 소스영역과 공기영역으로 구분된다. Fig. 3에는 VOC 물질이 포함된 재료에서 VOC 물질의 확산과정 메카니즘을 모델링하여 도시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 실내로 방출되는 VOC의 방출량(emission rate)에 영향을 미치는 인자로는 기류속도, 온도, 습

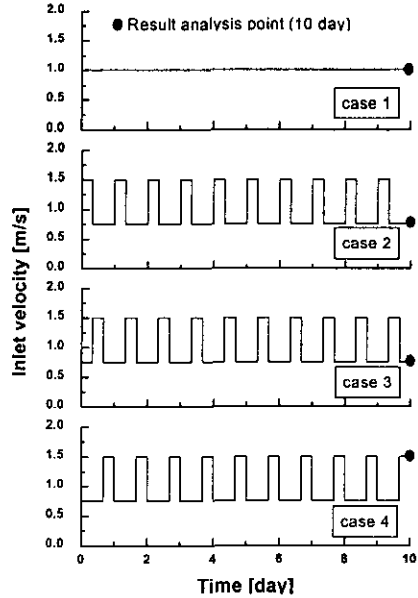


Fig. 2 Inlet velocity variation with time.

도, 난류강도, 공기 및 물질재료의 물질확산계수, 건축재료의 두께 및 초기 농도 등이 있다. 본 연구에서는 온도, 습도의 영향을 무시하였다.

VOC 소스영역 내부에서의 확산은 다음과 같은 2차원 확산방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{eff} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

위 식에서 C는 등가공기농도(equivalent air phase concentration, kg/kg)로써, VOC 소스영역에서의 농도로도 사용될 수 있다. D_{eff} 는 VOC의 유효확산계수(effective diffusion coefficient, m^2/s)이다.

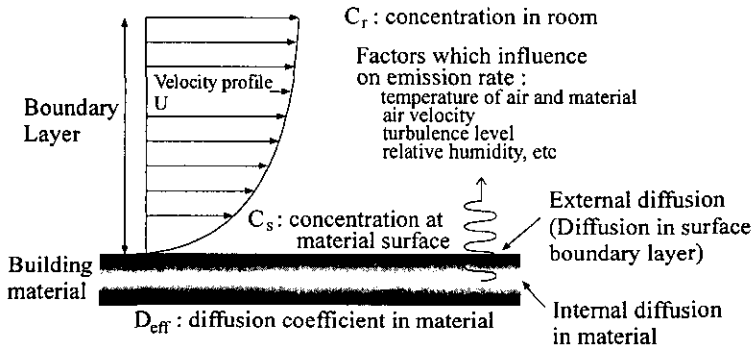


Fig. 3 Modelling of VOC emission at material surface.

VOC 소스영역에서 공기영역으로의 VOC 방출은 내부확산에 의한 VOC 이송량이 동일한 경계면에서 보존법칙(conservation law)을 만족시켜야 하며, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$-D_{eff} \frac{\partial C}{\partial y} | w.s. + = -D_a \frac{\partial C}{\partial y} | w.s. - \quad (2)$$

위 식에서 $w.s. +$ 는 VOC 소스영역에서의 경계면을, $w.s. -$ 는 공기영역에서의 경계면을 의미한다. 또한 D_a 는 공기 중의 VOC 확산계수를 나타낸다.

4. 지배방정식 및 경계조건

VOC 소스영역에서는 식(1)과 같은 비정상확산 방정식만이 지배방정식으로 사용된다. 공기영역에서 유동 및 농도를 기술하는 비정상상태의 지배방정식들은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지소산율방정식, 그리고 농도방정식이다. 본 연구에서는 등온상태에서 공기영역의 기류는 난류의 거동(표준 $k-\epsilon$ 모델)을 따른다고 간주하였다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

난류운동에너지방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} + G_k - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

난류운동에너지소산율방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right\} \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

농도방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho C) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i C) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\rho D_i + \frac{\nu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (8)$$

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (10)$$

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09 \quad (11)$$

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (12)$$

$$\sigma_l = 1.0, \quad \sigma_t = 1.0 \quad (13)$$

위 식들에서의 기호 선정은 일반적인 표시방식을 따랐다.

전술한 공기영역의 지배방정식들과 함께 정의되는 경계조건은 유입구, 유출구, 벽 그리고 공기

Table 2 Initial and boundary conditions in the air region and in the VOC source region

$t=0$	$C_0=0$ in air region $C_0=0.16$ kg/kg in VOC region
Inlet	no flushing : $v_{in} = -1.0$ m/s flushing : $v_{in} = -0.75$ m/s (decreased air supply) $v_{in} = -1.5$ m/s (increased air supply) $k_{in} = 1.5(0.02 \cdot v_{in})^2$ $\epsilon_{in} = C_\mu^{0.75} k_{in}^{1.5} / (0.1 \cdot L)$
Outlet	$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial C}{\partial y} = 0$
Wall	$u = v = 0, \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial y} = 0$ $\frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = 0$
Interface	$-D_{eff} \frac{\partial C}{\partial y} w.s. + = -D_a \frac{\partial C}{\partial y} w.s. -$

영역과 VOC 소스영역의 경계면에서 정의될 수 있으며, 그 상세한 내용은 Table 2에 나열하였다. 여기에서 유입구의 유속은 flushing이 존재할 때와 존재하지 않을 때에 대하여 각각 나타나 있으며 flushing의 경우 시간에 따른 공급유량이 제시되어 있다(Fig. 2 참조). 본 연구에서는 실내로 유입되는 공기는 신선한 상태인 것($C=0$)으로 가정하였으며, 시간당 교환되는 공기의 양은 계산 모델 부피의 5.3배에 해당된다.

본 연구에서 사용한 물성치는 23°C를 기준으로 선정하였으며, 이때 VOC 소스영역에서의 확산계수 D_{eff} 는 $1.10 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}^{(11)}$ 이며 초기의 농도는 0.16 kg/kg이다. 공기영역에서의 VOC 물질의 확산계수 D_a 는 $5.88 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 이고 초기에 신선공기만 존재하는 것으로 설정하였다.

5. 수치해석 방법

본 연구에서는 실내 공간의 VOC 거동특성을 해석하기 위하여 상용 CFD 코드인 PHOENICS⁽¹⁰⁾를 사용하였다. 이 프로그램은 완전암시기법을 사용한 유한체적법(finite volume method) 코드로서, 속도 등의 벡터량과 압력, 농도 등의 스칼라량의 위치가 서로 다른 엇갈린 격자계(staggered grid system)를 사용한다. 운동량방정식의 대류항을 계산하기 위해서 하이브리드 도식(hybrid differencing scheme)을 사용하였고, 속도장을 얻기 위하여 SIMPLEST 알고리즘을 사용하였다. 수렴판정 조건으로는 각 시간단계에서 입구에서의 운동량으로 정규화한 각 cell에서의 운동량 유수의 합, 연속방정식에서 유수의 합, 그리고 농도 방정식의 유수의 합이 모두 10^{-3} 이하일 때로 정하였다. 계산에 사용한 제어체적의 수는 공기영역에서 62×55 , VOC 소스영역에서 62×42 개로

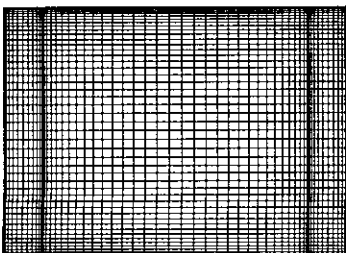


Fig. 4 Computational mesh (62×97).

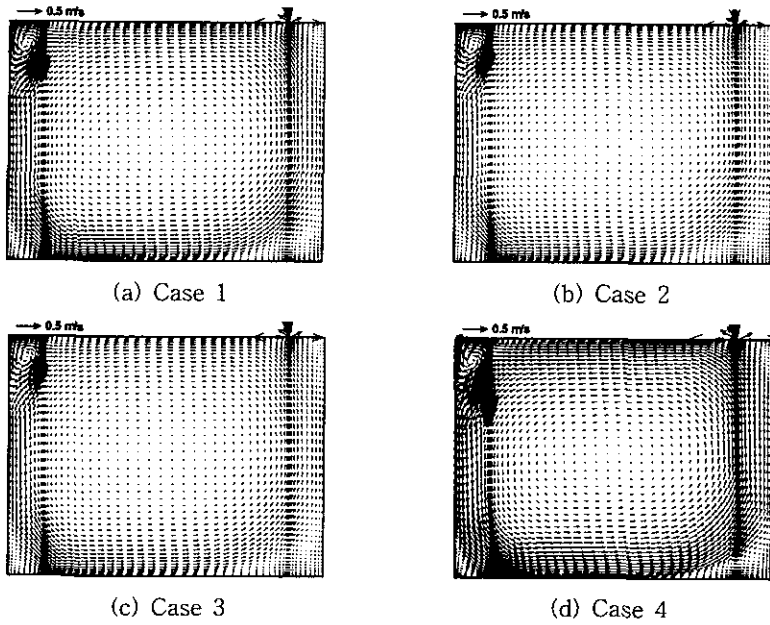
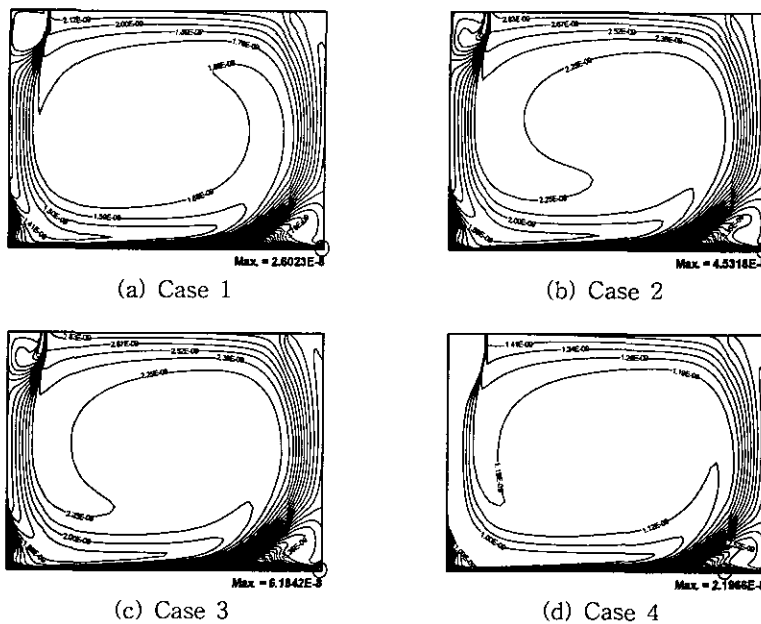
하여 모두 6014개이다. Fig. 4에 본 수치계산에서 사용된 격자계를 나타내었다. 본 계산에서는 총 10일(240 hours)의 시간경과에 대하여 계산을 수행하였다.

6. 결과 및 토의

각 계산 경우에서 동일시간 경과 후의 실내 기류특성을 살펴보기 위해 Fig. 5에는 10일 경과 후의 flushing 유·무와 flushing 시간에 따른 실내 속도벡터를 각각 나타내었다. 10일 경과 후의 각 계산 경우의 공기유입조건은 case 1의 경우 1 m/s이고, case 2와 3은 0.75 m/s로 동일하며, case 4는 1.5 m/s로 가장 크다. 각 계산 경우에 대한 시간대별 유입조건의 상세사항은 앞서 제시된 Fig. 2에 나타나 있다. 이때까지 신선공기의 총유입량은 네 경우 모두에서 동일하다.

Fig. 5(a)에 나타낸 case 1의 경우, 실내로 유입된 공기는 바닥을 향해 하강하여 좌측 하단부에서 우측 하단부로 바닥면을 따라 유동하고 유출구 쪽으로 상승한다. 유출구 쪽으로 상승한 공기의 일부는 우측 상단부에서 좌측 상단부로 유동하며 나머지는 유출구로 배출된다. 이때 실내 공간에는 정체영역을 의미하는 재순환 영역들이 중앙부에 크게 나타나며, 각 모서리 부근에서도 작게 형성된다. Fig. 5의 (b)~(d)의 경우, 유동특성은 Fig. 5의 (a)와 유사하며 다만 유입속도에 따라 속도벡터의 크기가 다를 수 있다.

Fig. 6의 (a)~(d)에는 Fig. 5에 나타낸 속도벡터와 동일한 시간(10일 경과 후)에서의 VOC 물질의 농도분포를 나타내었다. 네 경우에서 거의 동일한 유동특성에 기인된 유사한 농도분포 형태를 나타낸다. 실내의 농도분포는 모두 불균일하게 분포되어 있고, 바닥면 근처에서 큰 농도값이 나타났으며 구배 또한 크게 나타났다. 이것은 바닥에서 취침하는 사람에게 높은 농도의 VOC가 노출된다는 것을 의미한다. 실내 최대농도는 case 1~3에서 동일하게 정체영역이 존재하는 우측 하단의 모서리 부근에서 관찰된다. case 4에서는 우측 하단 모서리에서 약간 떨어진 저점에서 나타나는 데 이는 다른 세 경우에 비해 유입속도가 크므로 우측 하단 모서리에서 형성되는 재순환 영역에서의 재순환 유동이 다른 세 경우에 비해 크기 때문으로 사료된다. 최대농도는 case 3의

Fig. 5 Velocity vectors in the room ($t=10$ days).Fig. 6 Concentration contours in the room ($t=10$ days).

경우가 6.1842×10^{-8} kg/kg으로 가장 크며, case 4의 경우가 2.1966×10^{-8} kg/kg으로 가장 작다. 이는 각 시간대별 flushing 유·무와 flushing 시간에 따라 실내로 유입되는 신선공기량의 차이에 기인된다고 여겨진다. case 1과 case 2에서의 최

대농도는 각각 2.6023×10^{-8} kg/kg과 4.5318×10^{-8} kg/kg이다. Flushing이 없으며 유입속도가 1.0 m/s인 case 1을 기준으로 할 때, case 2와 case 3의 경우는 약 1.74배와 2.38배로 나타나고 case 4의 경우는 0.84배로 나타난다.

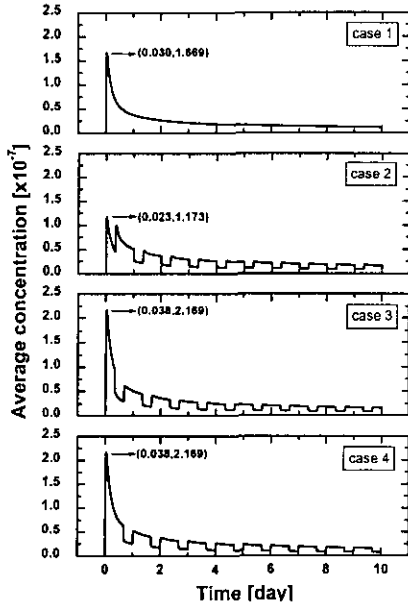


Fig. 7 Average concentration variation in the room (C/C_0).

VOC 소스영역의 초기농도(등가농도: $C_0=0.16$ kg/kg)를 기준으로 시간에 따른 실내 평균농도를 무차원화하여 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 괄호 안의 숫자들은 무차원화된 최대 실내 평균농도가 나타나는 시간과 그때의 양을 의미한다. 실내 평균농도는 모든 경우 초기에 급격히 상승하여 최대값에 도달한 후 빠르게 감소되며, 하루가 지난 후에는 모든 경우에서 유사하게 서서히 감소됨을 알 수 있다. 이는 초기 실내 농도를 0으로 간주하였고, VOC 소스영역 속에서 VOC 물질의 확산계수가 매우 작기 때문이다. 특히 case 2의 경우, 최초 flushing으로 인해 실내 평균농도의 최대값은 약 0.55 hour(0.023 day)가 경과된 후에 나타나며, 그 값은 1.173×10^{-7} 이다. flushing이 없는 case 1의 경우 0.72 hour(0.03 day) 경과 후 1.669×10^{-7} 으로 나타나며, case 3과 case 4는 동일하게 0.912 hour(0.038 day) 경과 후 2.169×10^{-7} 으로 나타난다. 최대 농도값은, flushing이 없는 case 1을 기준으로 할 때, case 2의 경우에는 약 0.7배로 나타나고 case 3과 case 4의 경우는 약 1.3배로 동일하게 나타난다. 또한 최대 농도값이 나타나는 경과시간은 case 1을 기준으로 case 2의 경우 23% 줄며, case 3과 4는 동일하게 27% 늘어남을 알 수 있다. Table 3(a)에 2일 경과마다

Table 3 Average concentration in the room and in the VOC source region (C/C_0)

(a) average concentration in the room($\times 10^{-7}$)

case day	case 1	case 2	case 3	case 4
2	0.2712044	0.3633347	0.3646492	0.1816399
4	0.1904363	0.2550718	0.2575143	0.1277611
6	0.1551308	0.2078149	0.2101368	0.1038630
8	0.1341908	0.1797012	0.1819075	0.0898766
10	0.1199206	0.1605975	0.1625532	0.0802825

(b) average concentration in the VOC source region

case day	case 1	case 2	case 3	case 4
2	0.9916644	0.9916794	0.9915844	0.9916644
4	0.9880163	0.9880375	0.9879713	0.9880163
6	0.9852281	0.9852538	0.9851988	0.9852281
8	0.9828844	0.9829138	0.9828675	0.9828844
10	0.9808225	0.9808569	0.9808144	0.9808219

의 실내 VOC 물질의 평균농도를 초기농도 C_0 로 무차원화하여 나타내었다. 표시된 모든 시점에서 case 4, case 1, case 2, 그리고 case 3의 순으로 농도값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 표시된 시점의 신선공기의 유입속도(량)이 case 4(1.5 m/s)가 가장 크고 case 1(1 m/s), case 2(0.75 m/s)와 case 3(0.75 m/s)의 순이기 때문이다. 중간 단계에서는 신선 공기의 유입속도에 따라 이 순위가 바뀌어진다. 중간단계에서의 실내 농도의 크기는 임의의 시점에서 신선 공기의 유입속도가 클수록 작게 나타난다(Fig. 7 참조). 동일한 유입속도에도 불구하고 case 2의 경우가 case 3보다 미소하게 작게 나타나는 것은 그 이전단계의 flushing의 영향으로 VOC 소스영역 안에서의 VOC 물질의 전달량이 미소하기 때문으로 판단된다.

시간에 따른 VOC 소스영역에서 초기농도 C_0 로 무차원화된 평균농도의 변화를 Fig. 8에 나타내었는데 10일 경과 후에 네 경우 모두 약 2% 정도 감소하였다, Table 3(b)에 각 경우에 대한 2일 경과마다의 VOC 소스영역에서의 평균농도를 초기농도 C_0 로 무차원화하여 나타내었다. 모든 경우에 있어서 VOC 소스영역에서의 평균농도는 거의 동일함을 볼 수 있다. 이로부터 VOC 소스영역으로부터 방출되는 VOC 물질의 방출량은 외부 유동장의 변화에 크게 영향을 받지 않음을 알

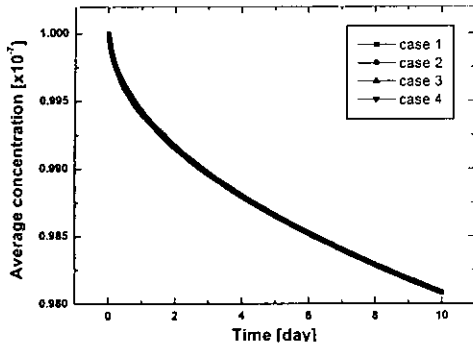


Fig. 8 Concentration variation in the VOC source region (C/C_0).

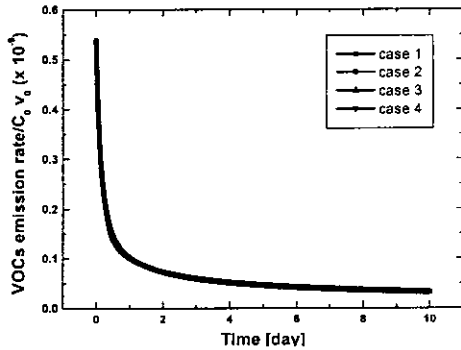


Fig. 9 VOCs emission rate at the interface.

수 있다. 이런 결과는 시간에 따른 VOC 소스영역으로부터 VOC 물질의 방출량을 초기농도 C_0 와 flushing 없는 경우의 유입속도 ($v_0=0.1$ m/s)로 무차원하여 나타낸 Fig. 9에서도 확인할 수 있다. 방출량의 감소는 초기에 급격하며 시간이 지남에 따라 방출량의 감소가 완만해져 거의 일정량을 방출하게 된다. 10일 경과 후의 방출량은 초기방출량의 10% 정도로 감소하였다. 모든 경우에서 미소한 방출량의 차이는 있었지만 거의 동일하였다.

10일 경과 후의 VOC 소스영역으로부터 VOC 물질의 방출량을 Fig. 9에서와 같은 방법으로 무차원하여 계면의 위치에 따라 Fig. 10에 나타내었다. 각 경우에서 위치에 따른 방출량의 변화는 미소하였다. 네 가지 경우에서 방출량의 최대 차이는 약 0.29% 정도로 나타났다. 이는 유입유량에 10배 차이를 둔 Murakami⁽¹²⁾의 연구결과와 유사한 결과를 보인다고 할 수 있다. 그는 VOC 물질의 확산계수가 작은 경우(약 1.0×10^{-14} m²/s)에서, 10배의 유입 유량 차이에도 불구하고 VOC

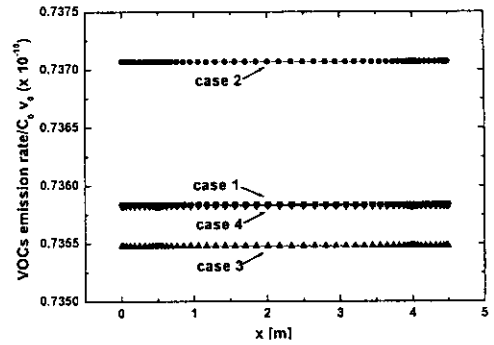


Fig. 10 VOCs emission rate at the interface ($t=10$ days).

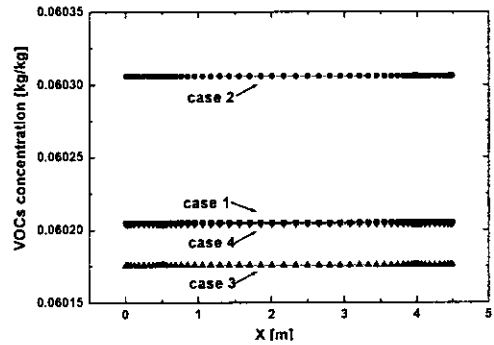


Fig. 11 VOCs concentration in a VOC source region underneath interface (C/C_0) ($t=10$ days).

소스영역으로부터 실내로의 VOC 방출량은 1~2%의 차이를 보인다고 보고한 바 있다. 따라서 본 연구에서와 같이 내부확산에 의해 지배되는 VOC 소스영역으로부터의 VOC 물질의 방출량은 환기율, 표면속도, 그리고 실내 농도 등에 의하여 크게 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

이는 VOC 소스영역에서 VOC 물질의 유효확산계수 D_{eff} 가 아주 작기 때문에 공기영역에서의 유동변화가 VOC 영역에서 공기영역으로의 VOC 물질의 방출량에 거의 영향을 주지 못하기 때문에 사료된다. 만약 VOC 소스영역에서 VOC 물질의 유효확산계수가 매우 크다면 공기영역에서의 유동변화에 따라 VOC 소스영역으로부터의 방출량이 변화하여 본 계산에서 수행된 flushing의 유·무에 따른 VOC 소스영역에서의 농도변화가 현저히 나타날 것으로 예측된다.

VOC 소스영역에서 계면과 인접한 부분에서

초기농도로 무차원된 농도를 위치에 따라 Fig. 11에 나타내었다. 위치에 따라 각 경우에서 극히 미소한 차이가 있었으나 거의 동일값을 나타내었다. 따라서 본 연구에서와 같이 확산계수가 작은 경우에 VOC 소스영역에서 VOC 물질의 확산은 2차원 확산보다는 1차원 확산에 가까운 확산특성을 가짐을 알 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 VOC 소스영역 내에서는 1차원 확산만을 고려하여도 무방하리라 사료된다.

상기에 나타낸 모든 결과로 미루어 VOC의 방출량은 초기에 상당히 크게 나타나며, 이를 빠르게 제거하기 위한 flushing은 초기에 실시하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 또한 VOC 물질의 유효확산계수가 본 연구에서 사용한 것과 같이 작은 경우에 VOC 소스영역에서 VOC 물질의 방출량은 외부 유동장의 유동특성에 크게 의존하지 않으므로 본 연구에서 제시된 flushing 기법과 유입공기의 온도를 변화시키는 baking 기법이 적절히 조합되는 경우에 VOC 물질의 제거에 더 효과적일 것으로 사료되며 향후 이에 대한 연구가 요망된다.

7. 결 론

본 연구에서는 VOC 물질의 방출과정을 모델링하고, flushing의 유·무와 flushing 시간변화에 따른 실내 공간에서의 VOC 거동특성을 해석하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 각 시간별 실내 최대농도는 flushing의 유·무와 flushing 시간에 상관없이 취침하는 사람에게 영향을 크게 미칠 수 있는 바닥면 근처에서 나타났다.

(2) VOC를 빠른 시간 내에 제거하기 위해서는 flushing을 하는 것이 효과적이며, flushing을 하는 경우에도 초기에 신선 공기의 유입량을 늘려주는 것이 더 효과적이다.

(3) VOC 소스영역에서의 VOC 방출량은 본 연구에서와 같이 유효확산계수가 작은 경우에 외부 유동장의 유동특성에 크게 의존하지 않는다. 따라서 유효확산계수가 작은 경우에 VOC 소스영역에서 VOC 물질의 제거에 flushing은 효과가 거의 없다.

(4) 본 연구와 같이 확산계수가 아주 작은 경우에 VOC 소스영역에서의 확산은 1차원 확산이 지배적이다.

후 기

본 연구는 1999년도 학술진흥재단(중점연구소 지원과제 : 99-005-E00025) 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. CFR 40, 1990, Code of federal regulations, Washington: Office of the federal register national archives and records administration, Chap. 1, Part 60.
2. USEPA, 1996, SWINE CAFO ODOR, No. 68-D3-0142.
3. USEPA, 1997, USEPA method TO-14A, 2nd ed.
4. The Minister of Environment of Korea, 1995, The Law of Environment Conservation.
5. Hays, S. M., Gobbell, R. V. and Gannick, N. R., 1995, Indoor Air Quality Solution and Strategies, McGraw-Hill, Inc.
6. Guo, Z. and Tichenor, B. A., 1992, Proceeding of EPA/ AWMA Symposium, Durham, NC.
7. Sparks L. E., Tichenor, B. A., Chang, J. C. S., and Guo Z., 1996, Indoor Air, Vol. 6, pp. 31-40.
8. Guo Z., Sparks L. E., Tichenor, B. A., and Chang, J. C. S., 1998, Atmospheric Environment, Vol. 32, pp. 231-237.
9. Guo, Z., Chang, J. C. S., Sparks L. E. and Fortmann R. C., 1999, Atmospheric Environment, Vol. 33, pp. 1205-1215.
10. CHAM development team, 1991, The PHOENICS manual, CHAM.
11. Yang, X., Chen, Q. and Bluysen, P. M., 1998, Prediction of short-term and long-term volatile organic compound emissions from SBR bitumen-backed carpet at different temperatures, ASHRAE Trans, Vol. 104, Part 2, pp. 1297-1308.
12. Murakami, S., Kato, S., Ito, K. and Yamamoto, A., 1999, Analysis of chemical pollutants Distribution based on coupled simulation of cfd and emission/sorption process,

Proceedings of the 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 4, pp. 725-730.