

통풍에 의한 휘발성 유기화합물의 실내 거동 특성에 대한 연구

김 장 우 · 정 진 도*

호서대학교 디지털디스플레이공학과, 호서대학교 환경공학과
(2005년 9월 16일 접수; 2006년 10월 26일 채택)

A Study on Behavior Characteristics of Volatile Organic Compound Caused by Ventilation in a Room

Jang-Woo Kim and Jin-Do Chung*

Department of Digital-Display Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

*Department of Environmental Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

(Manuscript received 16 September, 2005; accepted 26 October, 2006)

Recently, volatile organic compound(VOC) has been noted as a main cause of air pollution. VOC, with its toxic and offensive odor, is hazardous to health. Furthermore indoor, underground and high-rise buildings are preferable living spaces. People spend more than 80% of the day indoor, so indoor air pollution is a matter of importance. In Korea, from 2004, 10 types of indoor pollutants in public facilities have been identified. However, there is no standard for individual VOC, so the regulation has not yet effectively been carried out.

In this study, we have studied on the diffusion of Benzene in a room using a numerical analysis for various air-controlled conditions consisted of door, window and ventilation system. This study investigates spatial concentration distribution and time-history of room-averaged benzene concentration for several cases.

The results of this study show that when the room is ventilated by a small fan only for 30 minutes, the average concentration of benzene is decreased a very little, thus the impact to human body would be serious compared to the case of natural ventilation by window and door. In the case of natural ventilation by window and door, if the wind speed is higher than 0.5m/s, it takes small than 4 minutes for benzene to spread to the target concentration of 1.2mg/m³.

Key Words : VOC(volatile organic compound), Numerical analysis, Indoor concentration, Ventilation, Behavior characteristics

1. 서 론

휘발성 유기화합물(VOC ; Volatile Organic Compound)이란 증기압이 높아 대기중에서 쉽게 증발되고, 대기 중에 질소산화물과 공존시 태양광의 작용으로 인해 오존 및 PAN 등의 광화학물질을 생성시켜 광화학 스모그를 유발하는 물질의 총칭으로, 현재 국내에서는 탄화수소류 중 휘발성을 지닌 석유화학제품, 유기용제 또는 기타물질로 정의되고 있다. 즉, VOC는 대기오염 물질로서 유기증기(organic vapor)를 포함하는 대기 중의 휘발성 유기화합물의

총칭으로 오존 등 광화학스모그의 원인물질, 대기 중의 악취물질일 뿐만 아니라 환경 및 건강에 악영향을 초래하여 VOC의 감축은 공기 질 관리의 주요 정책 목표 중의 하나이다¹⁾.

특히 모든 생활 공간이 실내화, 지하화, 고층화하는 추세에 따라 일반인이 하루 중 실내에 체재하는 시간이 80%를 초과하므로 실내공기오염에 대한 관심과 중요성이 증대되고 있다. 우리나라에서는 지하역사와 같은 다중 이용시설에 대해 2004년부터 실내공간 오염물질 10가지를 설정하고, VOC 물질에 대해서는 총VOC 기준 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 적용하고 있다²⁾.

VOC 물질은 산업체 작업공간, 실내 건축재료등에서 방출되어 실내 공기의 질을 저하시키고, 인체

Corresponding Author : Jang-Woo Kim, Department of Digital Display Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea
Phone: +82-41-540-5925
E-mail: jwkim@office.hoseo.ac.kr

에 유해한 영향을 미치는 주된 원인이 되므로, 최근 VOC 물질을 제거하기 위한 특수 환기장치나 억제장치를 설치하고 있지만 소규모의 실내 공간 내에서의 VOC 물질의 대류 및 확산에 대한 선행 연구가 부족하여 적절한 실효성을 거두지 못하고 있는 실정이며, 따라서 VOC 물질의 효과적인 제거를 위한 실내에서의 VOC 방출량과 VOC의 거동 해석이 필수적이다.

VOC와 관련된 연구의 추세는 총탄화수소와 같은 총량적 개념보다는 개별 유기물에 대한 관리와 연구가 선호되는 실정이다. 그러나, 우리나라의 경우, VOC의 실측과 이에 관련된 방법론에 관한 여러 가지 연구가 진행되고는 있으나 주로 세정, 합성등의 석유화학 공업 분야에서 대량으로 배출되는 유기용매 가스에 대한 처리 기술 개발^{3,4)}에 관련되거나, 대기 중의 확산에 관련된 것^{5,6)}이 대부분이고, 최근에 실내 건축물에서 발생하는 VOC에 관한 연구가 시작되어 건축재로부터의 배출량 추정 및 확산에 대한 연구⁷⁻¹⁰⁾, 건축자재의 코팅을 통한 VOC의 분해에 관한 연구¹¹⁾ 등이 진행되고 있으나, 아직 VOC에 관련된 전반적인 데이터 베이스의 규모는 빈약하고, 분석의 대상이나 범위 등에 대한 연구 및 연구방법론에 있어서도 더 많은 연구가 필요한 실정이다. 특히, 적정 환기량등에 관련되어 환기에 의한 실내에서의 VOC의 확산에 관한 연구는 전무하다.

따라서 본 연구에서는 실내에서의 VOC의 거동특성에 대한 기초 연구로서 가상의 실내공간을 설정하고 실내의 일정 영역에서 VOC의 일종인 벤젠(Benzene)이 일정량 방출되었을때, 확산특성 및 환기장치와 자연통풍에 의한 강제 대류특성에 대해, 전산 유체역학(CFD ; Computational Fluid Dynamics)의 기법을 채용한 상용 프로그램인 Fluent¹²⁾를 이용하여 수치계산(numerical analysis)을 행하고, 시간의 변화에 따른 벤젠의 농도분포의 변화 그리고 목표 농도까지 희석되는 시간 및 벤젠의 확산에 의해 형성되는 유동장의 특징 등의 관점에서 살펴본다.

2. 계산방법

그림 1과 같이 총 체적 약 267m³인 실내의 중앙에 위치한 높이 0.97m의 테이블 중앙에서 증발면적이 0.09m²인 곳으로부터 벤젠이 증발하여 확산되는 계산 공간을 대상으로하여 계산을 수행하였다.

계산에 사용된 수치기법으로는 유동장의 난류 현상을 모사하기위해 K-ε 난류모델을 채용하였고, 운동량 방정식 및 난류에너지와 소산율 그리고 공기와 벤젠의 혼합에 의한 확산 현상을 지배하는 수송방정식(transport equation)을 채용한 에너지방정

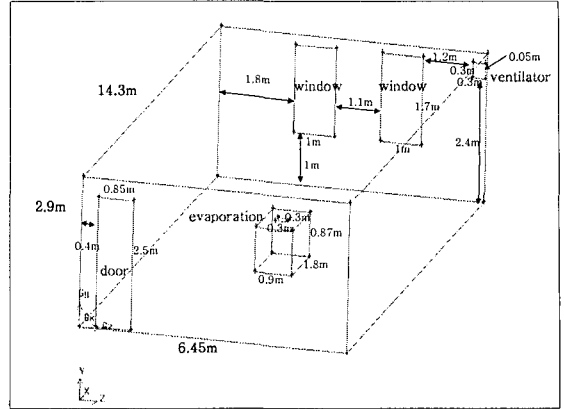


Fig. 1. Schematic diagram of computational domain.

식의 계산에는 2차 정확도의 풍상차분법(second-order upwind scheme)¹³⁾을 이용하였다.

속도와 압력의 coupling에는 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equation)법¹⁴⁾을 이용하였으며, 완화계수(Under-Relaxation factor)는 계산의 안정성을 위해 압력의 경우 0.3, 운동량은 0.7, 난류에너지 및 소산율은 0.8, 난류점성계수 및 에너지는 1로 정하여 계산을 수행하였다.

계산의 초기조건은 2ml의 벤젠액이 80℃의 벤젠 가스가 되어 10초 동안 계산 대상의 공간안으로 증발하는 것을 상정하였고, 이 경우 농도는 실내공간에 등농도 확산 시 질량기준으로 약 6.5mg/m³이며, 계산은 표 1과 같이 경계조건을 달리하는 4가지 경우에 대해 계산 영역 내의 벤젠 평균농도가 초기 농도의 5분의 1인 1.3mg/m³에 도달할 때까지 수행하는 것을 기본으로 하였으며, 시간이 30분이 경과하여도 목표 평균농도에 도달하지 않는 경우 다른 환기 방법이 필요한 것으로 판단하여 계산을 중지하였다.

Table 1에서 A는 문과 창문이 개방되어 있어 20℃, 1 기압인 외부와 내부의 계산 영역사이의 유동이 자유로우나 바람이 없는 경우이고, B는 창문으로부터 바람이 0.5, 1, 2, 3m/s의 속도로 유입되어 문으로 유출되는 경우이며, C와 D는 각각 문과

Table 1. Boundary conditions for each computational case

Boundary	Door	Window	Ventilator
A. No wind	Open	Open	Close
B. Wind			Open
C. Ventilation 1		Close	Open
D. Ventilation 2			Open

창문을 모두 개방하고 환풍구를 통해 0.5m³/s의 환기량으로 강제환기를 시키는 경우와 문만을 개방하고 환풍구를 통해 같은 환기량으로 강제환기를 시키는 경우이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 벤젠가스의 증발과 초기유동장

Fig. 2와 3은 각각 2m의 벤젠액이 80℃의 벤젠 가스가 되어 10초 동안 계산 대상의 공간 안으로 증발한 후의 유동장을 결과를 유체입자의 실제 경로를 나타내는 유적선(path line)의 분포와 벤젠의 농도분포를 이용해 나타낸 것이다.

Fig. 2와 3의 (a)는 문과 창문이 개방되어 있으나 바람이 없는 경우(Table 1의 A)로서, 외부로부터 계산 영역내의 유동장에 영향을 미치는 요소가 거의 없으므로 농도차에 따른 분자 확산에 의해 증발면의 상부와 좌우 50cm 이내에 벤젠의 질량분율이 1에서 0.3정도의 고농도 영역이 형성된다(Fig. 3). 증발된 벤젠과 공기의 온도차(공기 20℃, 벤젠 80℃)에 의한 대류에 의해 증발면으로부터 계산영역의 경계면인 문과 창문을 향하는 속도 분포를 형성하나, 3×10⁻⁴m/s 정도의 아주 작은 크기이다.

유적선의 분포로부터 문보다는 창으로 향하는 벤젠의 양이 많은 것을 알 수 있으며, 이것은 벤젠의 상대적 고온으로 형성된 압력이 동일한 대기압이지만 면적이 큰 창문 쪽으로 해소되어 압력이 평

균화되려하기 때문에 사료된다(Fig. 2).

(b)의 경우(Table 1의 B)는 바람이 0.5m/s의 속도로 창문으로 유입되어, 문으로 유출될 때를 나타낸 것으로 바람이 창으로 유입되어, 출입구로 유출되므로 이것에 의해 계산영역내의 유동장에 일정한 방향성을 갖는 흐름이 형성되어, 유적선이 문쪽을 향하고, 벤젠의 질량분율이 높은 영역도 문쪽으로 이동하며 바람이 없는 경우와 비교하여, 벤젠의 질량분율이 1에서 0.3정도인 고농도 영역이 축소됨을 알 수 있다. 유동장은 온도차에 의한 대류보다는 바람의 영향이 지배적이며, 바람의 속도에 따라 차이는 있으나, 바람이 없는 경우와 비교하여 10³배 정도 큰 속도 분포를 형성한다.

문과 창문을 개방하고, 환풍량 0.5m³/s로 강제환기를 실시하는 경우(Fig. 2와 3의 (c)), 유적선의 분포로부터 환풍기를 통해 외부로 유출되는 유량의 대부분이 창으로부터 유입된 공기이며, 이로 인해 환풍구에 인접한 영역의 속도가 5.56m/s에 달하여 계산영역 전체에는 큰 영향을 끼치지 못한다. 그러나, 환풍기를 통해 공기가 유출되어 발생하는 저압의 영향으로 문을 통한 공기의 상대적 미세 유입유동도 발생시킴을 알 수 있고, 이러한 유동이 증발 테이블 주위에서 벤젠의 고온에 의한 대류현상과 어울려 복잡한 와류영역을 형성시킨다. 이러한 와류의 영향에 의해 초기 벤젠의 고농도 영역이 바람이 없는 경우에 비교하여 축소되었음을 알 수 있다.

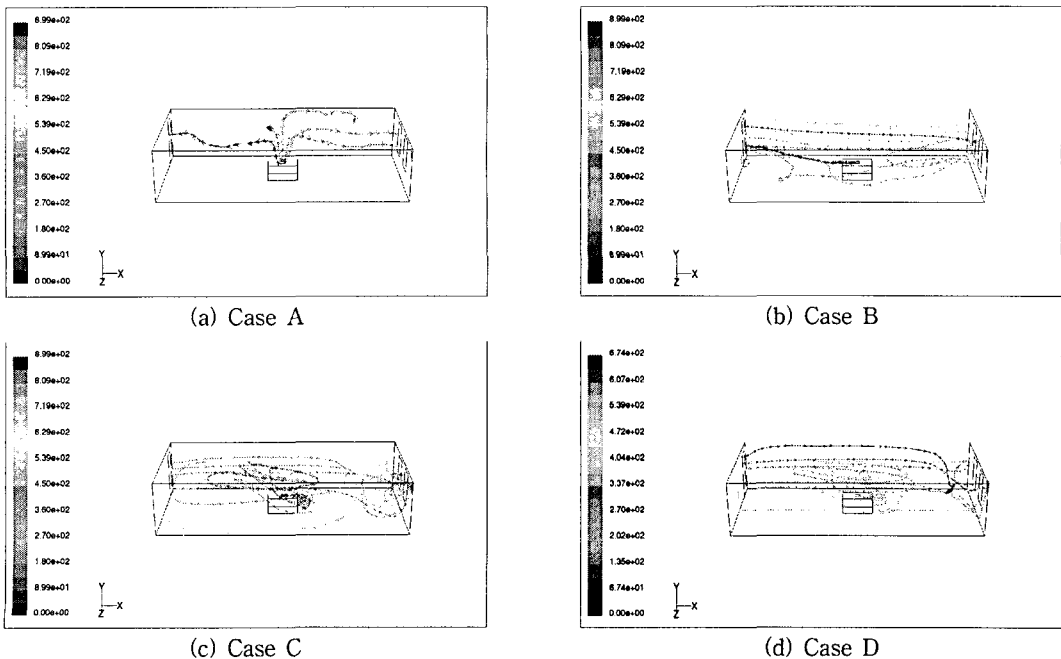


Fig. 2. Distributions of Path line after 10 seconds.

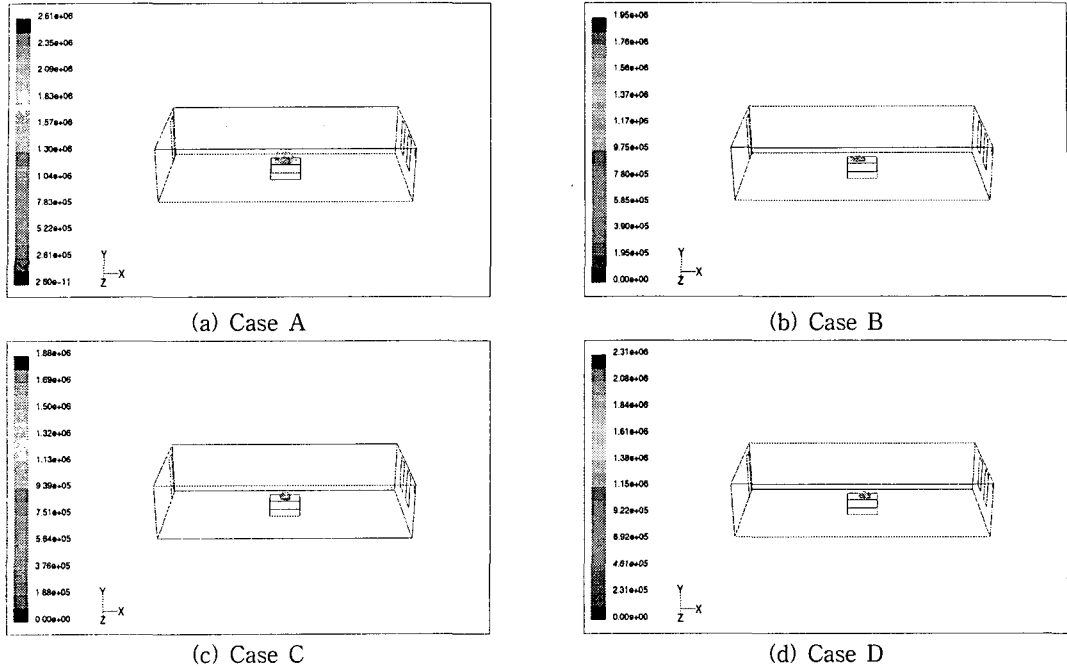


Fig. 3. Distributions of Benzene concentration after 10 seconds [mg/m^3].

Fig. 2와 3의 (d)의 경우는 문만을 개방하고, Case C(Table 1의 C))와 같은 환풍량으로 환기를 실시하므로, 환풍기를 통해 외부로 유출되는 유량은 문으로부터 유입된 공기이고, 이로 인해 벤젠의 고농도 영역 또한 환풍기 방향으로 미세하게 경도되며, 테이블 주위에 형성되는 와류 또한 문과 창문을 모두 개방한 후 환기를 행하는 Case C의 경우에 비해 큰 규모로 발생하여 와도(vorticity)가 약 3배 정도이다. 여기서 와도는 다음의 식(1)과 같이 정의되며, 각속도의 2배이다.

$$\Gamma = \nabla \times v$$

$$= \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) i + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) j + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) k \quad (1)$$

u, v, w 와 i, j, k 는 각각 x, y, z 방향의 속도 성분과 단위벡터를 나타낸다.

3.2. 확산 결과

Fig. 4의 (a)는 문과 창문이 개방되어 있으나 바람이 없는 경우로서, 30분 경과 후 유동장내 벤젠의 농도가 $987\text{mg}/\text{m}^3$ 인 최대농도 영역이 테이블 상면에서 계산 영역의 중앙 하부에 창 쪽으로 조금 치우친 곳에 위치한다. 공기에 비해 상대적으로 분자량이 큰 벤젠이 거의 외부로 확산되어 유출되지 못하고 바닥으로 침강하기 때문으로 사료되며, 이때 유동장의 평균농도는 $6.45\text{mg}/\text{m}^3$ 이다. 이와같이 창문과 문을 개방하여도 통풍량이 적으면 공기

보다 분자량이 큰 벤젠이 바닥근처에 고농도 영역을 형성하며, 거주자 이동등에 의한 난류발생으로 대류확산이 발생하므로 실내공기질의 악화가 우려된다.

(b)의 경우는 바람이 $0.5\text{m}/\text{s}$ 의 속도로 창으로 유입되어, 문으로 유출되는 경우를 나타낸 것으로 바람의 세기가 1, 2, $3\text{m}/\text{s}$ 일 때도 바람의 세기와 무관하게 형성되는 유동장의 형태는 유사하나, 벤젠의 확산 목표 농도치인 $1.3\text{mg}/\text{m}^3$ 까지 소요되는 시간이 풍속이 $0.5\text{m}/\text{s}$, $1\text{m}/\text{s}$, $2\text{m}/\text{s}$ 그리고 $3\text{m}/\text{s}$ 인 경우에 대해 각각, 4분, 1분 30초, 60초, 60초이다.

풍속이 $2\text{m}/\text{s}$ 와 $3\text{m}/\text{s}$ 인 경우, 소요시간은 60초로 동일하나, 벤젠의 평균농도가 각각 $0.84\text{mg}/\text{m}^3$ 와 $0.63\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 풍속이 빠를때의 값이 작다. 이것은 데이터를 샘플링하는 시간 간격을 좁히면 풍속이 빠른 경우가 목표 평균농도치에 도달하는 시간이 적게 소요됨을 의미한다.

(c)는 문과 창문을 개방하고, 30분간 강제환기를 실시하는 경우로서, 벤젠의 평균농도 $3.26\text{mg}/\text{m}^3$ 이며, 고농도 영역이 유동장의 영향으로, 증발 테이블 상부의 지면으로부터 1.7m 이상 떨어진 국소영역에서 형성되어, 인체에 미치는 영향이 환풍기가 없는 경우에 비해 클 것으로 예측된다.

이 경우의 시간에 따른 벤젠의 확산은 초기(5분)에 환풍기에 의해 형성되는 유동에 동반되는 동반류에 의해 환풍기 쪽으로 진행되나, 이 동반류가

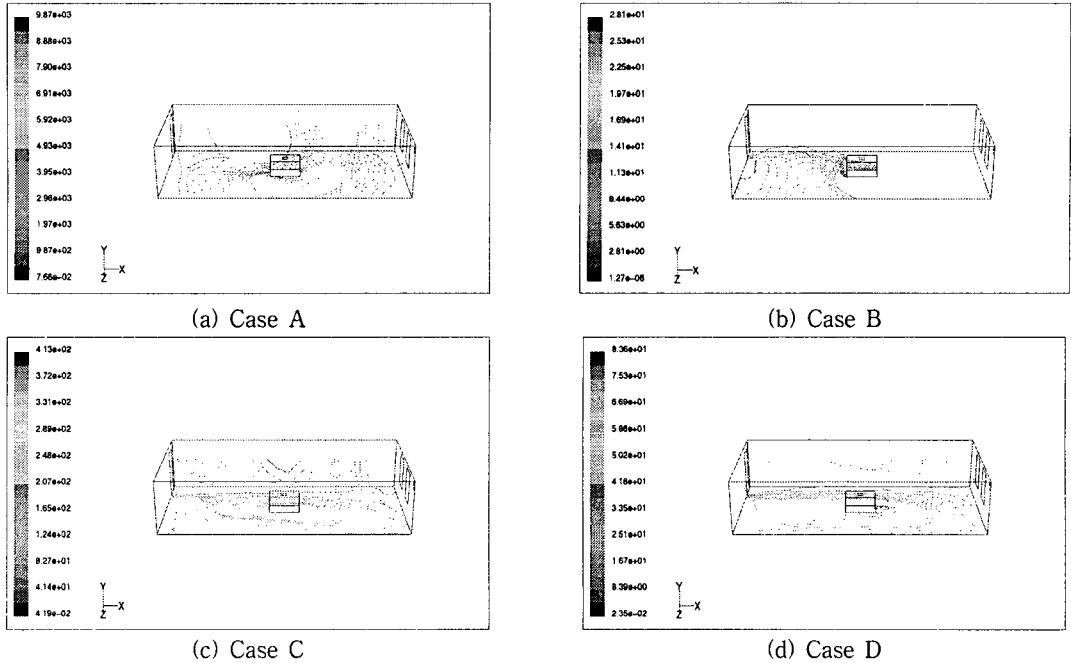


Fig. 4. Distributions of Benzene concentration [mg/m³].

선회하여 문쪽을 향하면서(10분) 확산도 문쪽으로 진행되며, 이 동안류가 평형을 이룬 후(30분)에는 환풍기를 통해 배출되는 벤젠의 양이 감소한다. 이때 벤젠의 농도는 시간과 더불어 감소하나 유동장 자체의 형태는 거의 정상 상태에 도달하며, 문을 통해 유입된 공기의 대부분은 벽에 인접하여 환풍기 쪽으로 이동하므로 벤젠의 농도가 높은 영역의 유동속도는 아주 작게되어 유동이 거의 없는 데드존(dead zone)과 유사한 유동을 형성한다.

문만 개방하고, 30분간 강제환기를 실시하는 경우(d)의 벤젠의 평균농도 1.41mg/m³이며, 문으로부터 환풍기 쪽으로 형성되는 유동에 의해 모든 시간대에서 고농도 영역이 증발 테이블로부터 환풍기 쪽으로 조금 치우쳐서 형성되며 최고농도 영역은 바닥 근처이다. 그러나 이 경우 테이블을 중심으로 약 0.5m 이내의 영역에서 벤젠의 농도가 7mg/m³ 이상이 되어, 확산의 효과가 크지 않은 것으로 판단되나, 환풍량이 같은 창과 문을 모두 개방한 경우와 비교하여 평균농도 및 국소최대농도가 Table 2와 같이 작은 값을 나타내며, 이것은 환풍량이 같은 경우에도 환풍에 의해 형성되는 유동장의 형상과 확산효과가 밀접한 관계를 갖는다는 것을 의미한다.

Fig. 5는 바람이 각각 0.5, 1, 2, 3m/s의 속도로 유입되어 문으로 유출될 때(Case B), 시간의 경과에 따라 누적 통풍량(실선)이 증가하여 계산 영역

Table 2. Local maximum concentration and mean concentration for each case

Case \ Item	Local maximum concentration [mg/m ³]	Mean concentration [mg/m ³]	Time [min]	
A. No wind	986.8	6.45	30	
B. Wind	0.5 m/s	28.14	0.82	4
	1 m/s	37.45	0.9	1.5
	2 m/s	15.68	0.84	1
	3 m/s	12.53	0.63	1
C. Ventilation 1	413.4	3.26	30	
D. Ventilation 2	83.4	1.41	30	

내의 평균농도(점선)가 감소함을 나타낸 것으로, 그림의 V0.5, V1, V2 그리고 V3은 각각 풍속이 0.5, 1, 2, 그리고 3m/s임을 나타낸다.

일반적으로 누적 통풍량의 증가가 평균농도를 감소시키는 것은 당연한 결과이나, Fig. 5의 3m/s의 경우처럼, 풍속이 일정 크기(2m/s) 이상이면 유속에 비례한 환기효과의 증대를 기대할 수 없으며, 이것은 계산 모델(실내)의 구조에 의해 형성되는 유동장의 형태에 의존할 것으로 사료된다.

본 연구의 경우, 계산 영역 내 약 6.5mg/m³인 벤젠의 평균농도가 5분의 1인 1.3mg/m³에 도달할

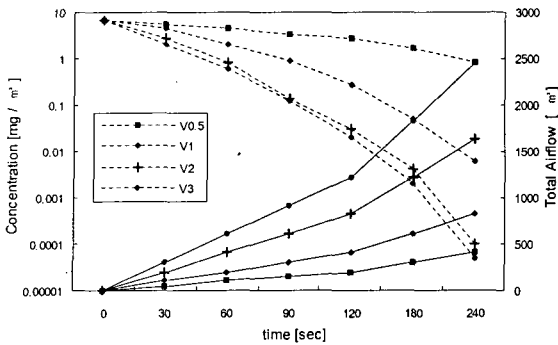


Fig. 5. Time-depend change for Benzene concentration and total airflow.

때까지 통풍시간을 고려할 경우, 0.5, 1, 2, 3m/s의 풍속에 대해 각각 약 334, 272, 340, 428m³의 누적 통풍량이 필요하며, 이는 실내공기 체적(약 266m³) 대비 통풍량의 비율로 환산하여, 1.26 : 1.02 : 1.28 : 1.61로서 풍속이 1m/s일 때가 가장 경제적인 환기효과를 나타낸다. 이것은 일정한 농도 목표값을 달성하기 위해 필요한 적정 강제 환기량이 존재하며 최적 환기량은, 환풍구 위치 등의 실내 구조, 환기시간 그리고 유속의 함수로서 정의할 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서 벤젠의 실내확산에 대한 수치해석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 창문과 문을 개방하여도 통풍량이 적은 경우, 공기보다 분자량이 무거운 벤젠이 바닥근처에 고농도 영역을 형성하며, 거주자 이동등에 의한 난류발생으로 대류확산이 발생하므로 실내공기질의 악화가 우려된다.

(2) 등농도 확산 시 질량기준으로 약 6.5mg/m³인 벤젠의 농도가 목표치인 1.3mg/m³에 도달할 때까지 통풍시간을 고려할 경우, 0.5, 1, 2, 3m/s의 풍속에 대해 실내공기 체적(약 266m³) 대비 통풍량의 비율로 환산하여, 1.26 : 1.02 : 1.28 : 1.61로서 풍속이 1m/s일 때가 가장 경제적인 환기효과를 나타낸다.

(3) 위의 항(3)에서의 언급한 시간과 풍속의 함수로서의 환기효과는 통풍구(문, 창문, 환풍구 등)의 위치와 실내 구조물 등에 영향을 받아 형성되는 유동장의 형상에 기인한다.

(4) 일반적으로 실내에 설치하는 환풍기의 용량(0.5m³/s 전후)으로는 분자량이 큰 벤젠과 같은 VOC 물질에 대해 단시간에 환기효과를 기대할 수 없다.

(5) 강제환풍의 경우, 환풍량이 같은 경우에도 강제환풍에 의해 형성되는 유동장의 형상과 확산 효과가 밀접한 관계를 갖는다.

감사의 글

본 연구는 충남환경기술개발센터의 연구비로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 허규석, 백성옥, 1998, 대기환경과 휘발성 유기 화합물질, 한국대기보전학회 추경분석 위원회, pp.107-131.
- 2) 환경부 홈페이지(www.me.go.kr)
- 3) 서봉국, 나영수, 송승구, 2003, 휘발성 유기 화합물(VOCs) 처리기술, 한국환경과학회지, 12(7), 825-833.
- 4) 박영근, 고민수, 차순우, 문정우, 박현수, 이종협, 2001, CFD를 이용한 공정 VOC 배출원의 배출량 추정 연구, 2001 춘계학술발표논문집 (2), 대한환경공학회, 7pp.
- 5) 김조천, 김기현, 2000, 대기 중 휘발성유기화합물의 시간적 농도 변화에 대한 연구, 한국환경과학회지, 9(6), 483-488.
- 6) 김미숙, 김종호, 이종협, 2004, 대기중 VOCs 농도확산모델의 개발, 춘계학술발표논문집, 대한환경공학회, 655pp.
- 7) Sparks L. E., B. A. Tichenor, J. C. S. Chang and Z. Guo, 1996, Indoor Air, 31pp.
- 8) 이상형, 박진철, 이연구, 1996, 공동주택 실내 공기환경 개선에 관한 연구, 공기조화냉동공학회, 8(3), 397-412.
- 9) 최청렬, 이승철, 김창녕, 2000, 실내공간에서의 휘발성유기화합물질의 거동 특성, 하계학술발표논문집, 공기조화냉동공학회, 704pp.
- 10) 이승철, 최청렬, 김창녕, 2001, 휘발성 유기화합물의 거동특성 예측을 위한 수학적 모델링 및 실내 환기특성 연구, 설비공학회 논문집, 13(7), 627-636.
- 11) 조완근, 전희동, 2005, 건축자재의 산화티타늄 코팅을 통한 휘발성 유기화합물 분해, 한국환경과학회지, 14(8), 785-792.
- 12) 2001, Fluent User Guide, Fluent Inc.
- 13) Anderson, D. A., J. C. Tannehill and R. H. Pletcher, 1984, Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, McGraw-Hill, 199pp.
- 14) Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer & Fluid Flow, McGraw-Hill, 79pp.