

아파트주택에 있어서 실내공기청정기에 의한 환기의 수치해석

고재윤[†], 김일겸, 최병훈^{*}, 임장순^{**}
인하대학교 기계공학과 대학원, ^{*}강남필터(주), ^{**}인하대학교 기계공학과

A Numerical Analysis on Forced Ventilation using Indoor Air Cleaner in an Apartment House

Jae-Yoon Koh[†], Il-Gyoum Kim, Byoung-Hun Choi^{*}, Chang-Soon Yim^{**}
Graduate school, Department of Mechanical Eng., Inha University, Incheon 402-751, Korea
^{*}KangNam Filter Co., Incheon 405-100, Korea
^{**}Department of Mechanical Eng., Inha University, Incheon 420-751, Korea

(Received March 13, 2000; revision received November 14, 2000)

ABSTRACT: There exist a number of approaches which can evaluate ventilation and indoor air quality. The measurement and analysis of indoor carbon dioxide concentrations can be useful for evaluating indoor air quality and ventilation. This paper describes a numerical analysis of carbon dioxide concentrations for evaluating indoor air quality and ventilation and the factors that need to be considered in their use. The conditions of this numerical analysis are two types of positions and inlet velocities of ventilation system in a two-dimensional model of an apartment house. The simulation results could be used as a base data for further analysis for ventilation design of other industrial processes producing a proper ventilation system for a healthier and more comfortable environment in a building.

Key words: Ventilation(환기), Standard k-ε model(k-ε 난류모델), IAQ(실내 공기질)

기 호 설 명

그리스 문자

c : 무차원 농도
D : 확산계수
h : 열전달계수 [W/m²K]
k : 열전도율 [W/mK]
P : 압력 [kg/m²]
u : 속도 [m/s]
k : 난류운동에너지

α : 1/Pr = k/μc_p
ε : 난류에너지 소산율
μ : 점성계수 [kg/s · m]
ρ : 밀도 [kg/m³]
ν : 동점성계수 [m²/s]

1. 서 론

환기(ventilation)⁽¹⁾란 실외로부터 청정한 공기를 공급하여 실내의 오염공기를 실외로 배출해서 실내의 오염공기를 환기 또는 희석하는 것을 말한다. 환기의 목적은 실내공기의 열, 증기, 악취, 분진, 각종 오염물질 등에 의한 오염과 산소농도

[†] Corresponding author
Tel.: +82-32-872-8228; fax: +82-32-872-8228
E-mail address: g9741106@inhavision.inha.ac.kr

의 감소에 의한 재실자의 불쾌감이나 위생적 위험성이 증대되는 것을 방지하는 것에 있다. 환기의 방법에는 자연력을 이용하는 자연환기(natural ventilation)와 기계력을 이용하는 기계환기 혹은 강제환기(mechanical ventilation or forced ventilation) 등이 있다. 그러나 실제로는 어느 한 방법만 제한하여 사용하지 않고 양자를 조합하여 사용하는 것이 일반적이다.

주택의 대량공급과 더불어 각종 기기나 건축재료의 다양화에 따라 건물 구조재와 마감재 및 각종 가구설비 등으로부터 새로운 오염물질의 배출은 날로 오염도가 심각해지고 있다. 특히, 신축 아파트의 실내 공기에서 발암성 물질인 벤젠, 톨루엔, 크실렌 등의 휘발성 유기화합물질이 상당량 함유되어 있는 것으로 조사되어 실내 공기오염에 대한 대책이 시급하다.^(2,3) 실내 공기질의 개선방안으로 다양한 방법으로 자연환기를 실시하고 있으나 오염공기가 충분히 배출되지 못할 뿐 아니라 외기가 오염된 최근의 대기상태에서는 신선한 공기가 유입되지도 못하여 환기효과를 기대하기 힘들다.⁽⁴⁾

건축물에서의 오염공기를 효과적으로 제어하기 위해서는 다양한 변수의 조건하에서 실내의 유동현상을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 그러나 건축물의 규모나 특성상 실제 모델을 통한 실험적 방법으로 다양한 조건의 결과를 도출하는 것은 기술적으로나 경제적으로도 매우 어려운 문제이다. 따라서 최근 연산기술의 발전과 더불어 수치해석적 방법으로 건축 내에서의 오염물질의 분포와 다양한 조건하에서 우수한 환기효과를 도출해 내는 연구들이 관심을 모으고 있다.

Han^(5,6)은 실내공간에서 계산된 난류유동형태를 이용하여 국부 평균연령 및 국부 농도감소를 등의 환기효율의 정량적 접근방법을 제시하고, 급기 송풍량 및 급기의 유입각의 변화가 실내 유동형태와 환기효율에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

Jang⁽⁴⁾은 단순 3차원 실내공간에서 급배기구의 형태와 오염물질의 발생위치가 유동현상과 오염물질의 농도분포에 미치는 영향 등을 해석하였다.

본 연구에서는 벽면에 설치된 급배기 일체형 공기청정기⁽⁷⁾의 실내 오염공기 환기효과를 검토하기 위해 급배기구의 위치 및 속도변화가 미치는 영향에 대해 연구하였다. 실내 오염공기농도를 무차원화하여 환기효과를 정량화할 수 있었고

또 본 수치해석적 방법을 통해 얻은 결과로 공기청정기 설계의 자료로 사용될 것으로 기대된다.

2. 해석 이론

2.1 수치해석 가정

유동 및 열전달 특성을 수치해석함에 있어 유체는 2차원 비압축성 정상 및 비정상 유동이고 복사 열전달 및 중력에 의한 영향, 유동방향의 체적력(body force)은 무시하고 화학적 반응에 의한 생성이나 소멸은 없고 유체는 이상기체의 상태방정식을 따른다고 가정하였다.

2.2 지배방정식^(8,9,10)

상기의 가정사항에 따라 열·유동 특성을 지배하는 보존방정식인 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, $k-\epsilon$ 난류모델의 난류 운동에너지(k) 및 난류 소멸률(ϵ) 방정식은 다음과 같다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} \\ + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u_i u_j}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \overline{\rho u_i u_j} = \rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ + \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \end{aligned}$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \quad \text{유효점성계수}$$

에너지방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right\} + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 h 는 엔탈피, k 는 열전도율 및 k_i 는 난류 유효열전도율이다.

$$h = \sum_i m_i h_i \quad \text{여기서} \quad h_i = \int_{T_{ref}}^T C_{p,i} dT$$

S_h 는 화학반응 및 상변화에 의한 열, 복사열 및 기타 열원 등을 포함하는 생성항을 의미하며 이러한 현상들은 일어나지 않으므로 이 항은 해석시 고려하지 않았다.

k-방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (4)$$

ϵ -방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right\} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$G_b = \frac{\mu_t g_i \beta}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (7)$$

여기서, α_k 및 α_ϵ 은 각각 k 및 ϵ 의 난류확산에 관한 프란틀수의 역수이다.

물질의 수송방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_i) = - \frac{\partial}{\partial x_i} J_i + R_i + S_i \quad (8)$$

R_i 는 화학반응에 의한 생성 또는 소멸항이고 S_i 는 상변화에 의한 생성항이다. 여기서 반응현상은 없는 것으로 가정하여 이 두 항은 무시한다.

Table 1 Constants of standard k- ϵ model

C_μ	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	$C_{3\epsilon}$	α_k	α_ϵ
0.09	1.44	1.92	1.0	1.0	1.3

Table 2 Properties of CO₂ gas

C_p	870.9	J/Kg · K	specific heat of constant pressure
k	0.0166	W/m · K	thermal conductivity
α	1.06e-05	m ² /s	mass diffusivity
ν	0.832e-05	Kg/m · s	kinematic viscosity

J_i 는 확산 flux로 아래와 같다.

$$J_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial m_i}{\partial x_i} \quad (9)$$

여기서 $Sc_t = \text{난류 Schmidt No.} \left(\frac{\mu_t}{\rho D_t} \right)$

Step-down 방법을 적용하여 초기 실내 오염물질의 농도가 CO₂ 1.0으로 균일하고 외기의 농도를 0.0으로 무차원화하였다. 실내 유동은 농도분포의 영향을 받지 않는다고 가정하였다. 난류 Schmidt 수는 1.0으로 정하여 난류유동에 의한 농도 확산계수가 난류 점성계수와 같게 하였다.⁽¹¹⁾ 실내에는 오염원이 없고 벽면에서의 농도 구배는 0이 되도록 경계조건을 적용하였다. 해석에 사용된 CO₂의 물성은 Table 2와 같다.

2.3 경계조건

공기청정기의 두 가지의 운전조건에 대하여 입구의 유속을 변화(2.0, 3.8 m/s)시켰으며, 공기청정기 입구에서의 온도는 293 K로 적용하였다. 벽면에서의 유체 열유동조건은 점착조건(no slip condition) 및 Neumann 형 경계조건을 적용하였다.

$$u = v = k = \epsilon = 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

여기서 n 은 경계면에 수직한 방향을 의미하며 ϕ 는 u, v 및 k, ϵ 등을 나타낸다. 벽면이 유동에 미치는 영향을 계산하기 위해서 벽 근처의 격자점에 사용되는 Non equilibrium 벽함수를 적용하였다. 벽온도는 298 K로 일정하다고 가정하였고, 공기청정기로부터 유입되는 공기는 실내를 순환한 뒤 벽면을 따라 외부로 방출된다. 이때 출구조건에서는 정압조건을 적용하였다.

2.4 수치해석

2.4.1 수치해석 방법

유입되는 공기는 면적 변화량이 큰 충돌지역에서 대규모의 와류가 생성되고, 다양한 벽면에서의 유동특성과 열전달특성이 복잡하다. 이와 같은 복잡한 열유동장에 대한 정확한 해석과 오류 확산(false diffusion)을 최소화하기 위하여 가능한 최적의 알고리즘과 격자체계를 고려하였다. 수치해석으로는 유한체적법(FVM)을 사용하였으며, 이를 위하여 이산화과정을 통하여 지배 미분방정식을 연립 대수방정식으로 변환한 후 해를 구한다.⁽¹²⁾ 본 연구에서는 열 및 유동장해석을 위하여 지배방정식은 경계고정좌표계에 효율적인 비 엇갈림 격자체계를 적용한 미소 검사체적에 대한 적분을 이용하여 유한차분방정식(finite difference equation)으로 이산화하였다. 유한차분방정식의 해를 구하기 위하여 SIMPLEC(SIMPLE-Consistent) 알고리즘을 적용하였으며 설정된 설계를 해석하기 위하여 열·유체 해석용 코드인 FLUENT/UNS를 사용하였다.⁽⁸⁾

2.4.2 격자 체계

실험과 동일한 조건에서 해석하기 위하여 Fig. 2와 같은 격자체계를 적용하였다. y에서 음의 방향으로 본 평면도면은 아파트의 거실 및 주방을 포함한 형상이다. 격자구조는 삼각형이며 Mesh 개수는 2532개이다.

3. 해석결과 및 고찰

기하학적 형상 및 격자를 구성하고 Table 3과 같은 경계조건을 대입하여 해석한 결과 다음과

Table 3 Boundary conditions of analysis

wall	Inlet	Inlet Velocity	Outlet
298 K	Temp: 293 K O ₂ : 1.0	3.8 [m/s]	Standard Condition
		2.0 [m/s]	

같은 결과를 얻을 수 있었다.

3.1 속도분포

Fig. 3.1(a)는 급배기구의 위치가 하부에 위치했을 때의 유동의 속도벡터를 나타낸다. Fig. 3.1(a)에서 보여준 바와 같이 급기구를 시작으로 전체 실의 약 2/3에 미치는 큰 와류를 형성하고 있으며 나머지 1/3부분의 공간에서도 와류의 형태가 유지되고 있어 이와 같이 공간의 중앙부에 급배기구를 위치하는 것이 환기작업에 있어 매우 양호한 결과를 얻을 수 있음을 예상할 수 있다.

Fig. 3.1(b)는 급배기구의 위치가 상부에 위치했을 때의 공간상에서 유동의 속도벡터를 보여주고 있다. Fig. 3.1(b)에서 보여준 바와 같이 급기구를 시작으로 초기부분에서만 입구속도 3.8 m/s에 해당하는 속도벡터를 보유할 뿐 진행 초기에 벽면을 따른 전단응력의 영향으로 급격히 벡터성분이 감소하여 실 전반적으로 완만한 운동의 형태를 띄고 있다. 특히 실공간에서의 대공간 약 2/3를 제외한 나머지 1/3부분에서의 속도벡터는 매우 미소하여 환기작업에 있어 이와 같은 급배기구의 위치는 매우 불리한 구조임을 알 수 있다. 초기 입구속도 2.0 m/s일 때의 급배기구의 위치에 따른 벡터의 형태 및 크기 또한 Fig. 3.1과 비교하여 크게 다르지 않았다. Fig. 3.2(a)은 급배기구의 위치가 하부에 위치했을 때의 유동의 속

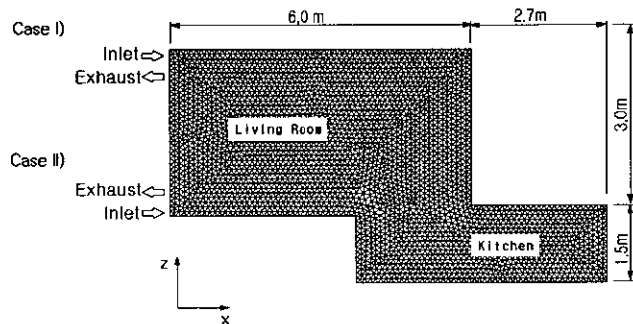
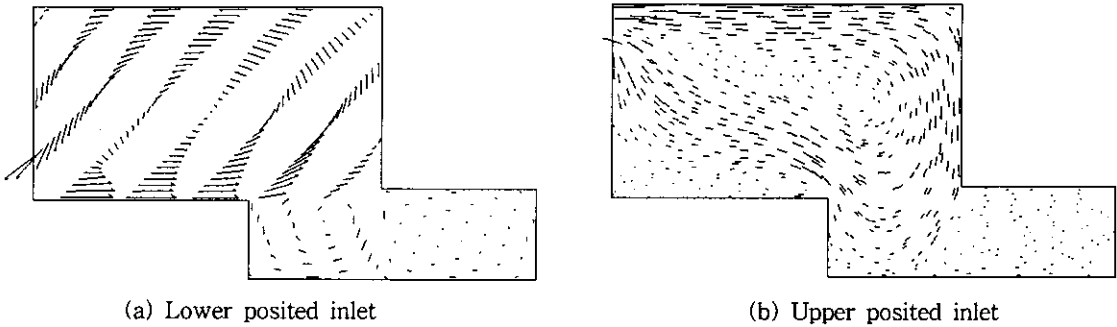
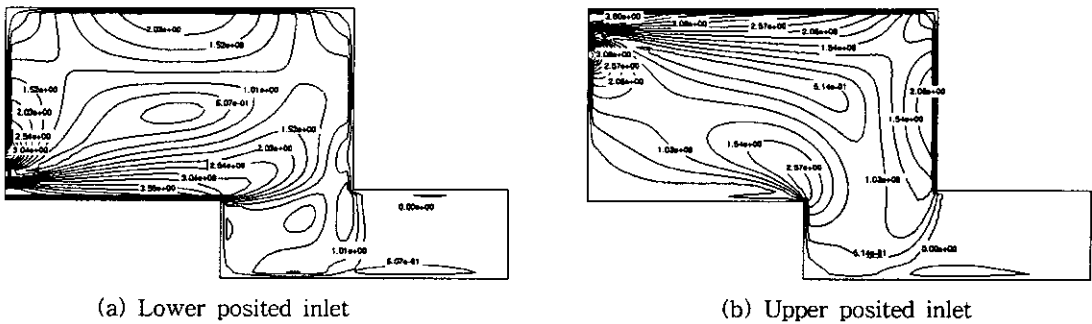


Fig. 2 Schematic figure of the computational domain with the grid pattern.

Fig. 3.1 Velocity vector of x-z plane ($V_{in}=3.8$ m/s, at 150s).Fig. 3.2 Velocity distribution of x-z plane ($V_{in}=3.8$ m/s, at 150s).

도분포를 보여주고 있다. 정지상태의 실내공간에 급기구를 통하여 3.8 m/s의 O_2 gas가 공급되었을 경우 실내 기류는 1~2.5 m/s의 속도분포를 나타내며 이는 ASHRAE의 권고 환기유동속도이기도 하다.⁽¹²⁾

Fig. 3.2(b)는 급배기구의 위치가 상부에 위치했을 때의 유동의 속도분포를 보여주고 있다. 정지상태의 실내공간에 급기구를 통하여 3.8 m/s의 O_2 gas가 공급되었을 경우 실내기류는 0~2.0 m/s의 속도분포를 나타내며 그 유동의 영향은 소공간 약 1/3부분에는 거의 미치지 못한다.

특히, Fig. 3.2(a)의 속도분포는 벡터형태에서 보았듯이 Fig. 3.2(b)의 경우와 비교하여 하부의 1/3 소공간 부분까지 유속이 유지되고 있어 오염 유체의 환기작용이 더 우수함을 예상할 수 있다.

3.2 온도분포

Fig. 3.3(a)는 급배기구의 위치가 하부에 위치했을 때의 실내온도를 보여주고 있다. 298 K로 유지되고 있는 실 전체에 293 K의 O_2 gas가 급

기구를 통하여 공급되었을 경우 실내의 온도차에 의해 열전달이 발생되고 실내의 전체적인 온도분포는 신선외기에 가까워져 약 294 K의 분포를 보인다. Fig. 3.3(b)는 급배기구의 위치가 상부에 위치했을 때의 공간상에서 실내온도를 보여주고 있다. 298 K로 유지되고 있는 실 전체에 293 K의 O_2 gas가 급기구를 통하여 공급되었을 경우 실내의 온도차에 의해 열전달이 발생되고 실내의 전체적인 온도분포는 신선외기와 혼합되지만 유체의 유동이 상대적으로 둔화되어 Fig. 3.3(a)의 경우보다는 높은 약 296 K의 분포를 보인다.

3.3 오염물질의 농도 분포

Fig. 3.4(a)는 급배기구의 위치가 하부에 위치했을 때의 실내 각 부분에서의 시간에 따른 오염물질 CO_2 의 농도감소분포를 보여주고 있다. 실 전체에 CO_2 gas가 충만한 상태에서 급기구를 통하여 O_2 gas를 공급하였을 경우 화학적 반응 없이 단지 확산 및 유체유동에 의해 배기구를 따라 감소되는 CO_2 농도분포를 무차원화하여 보인 것

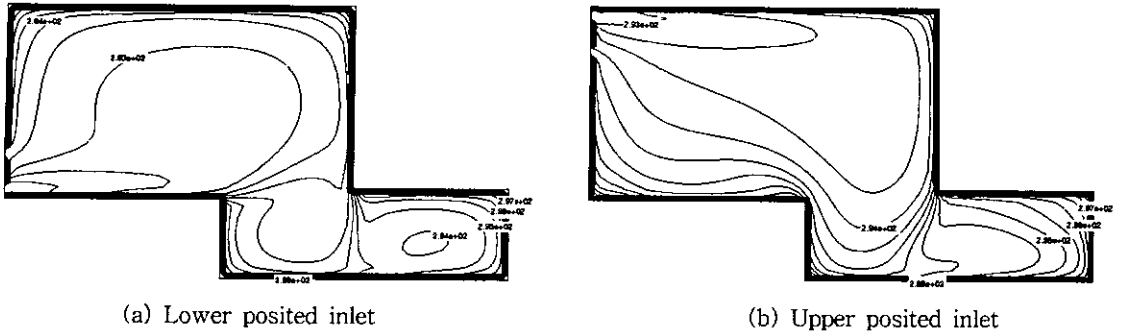


Fig. 3.3 Temperature distribution of x-z plane (Vin=3.8 m/s, at 150s).

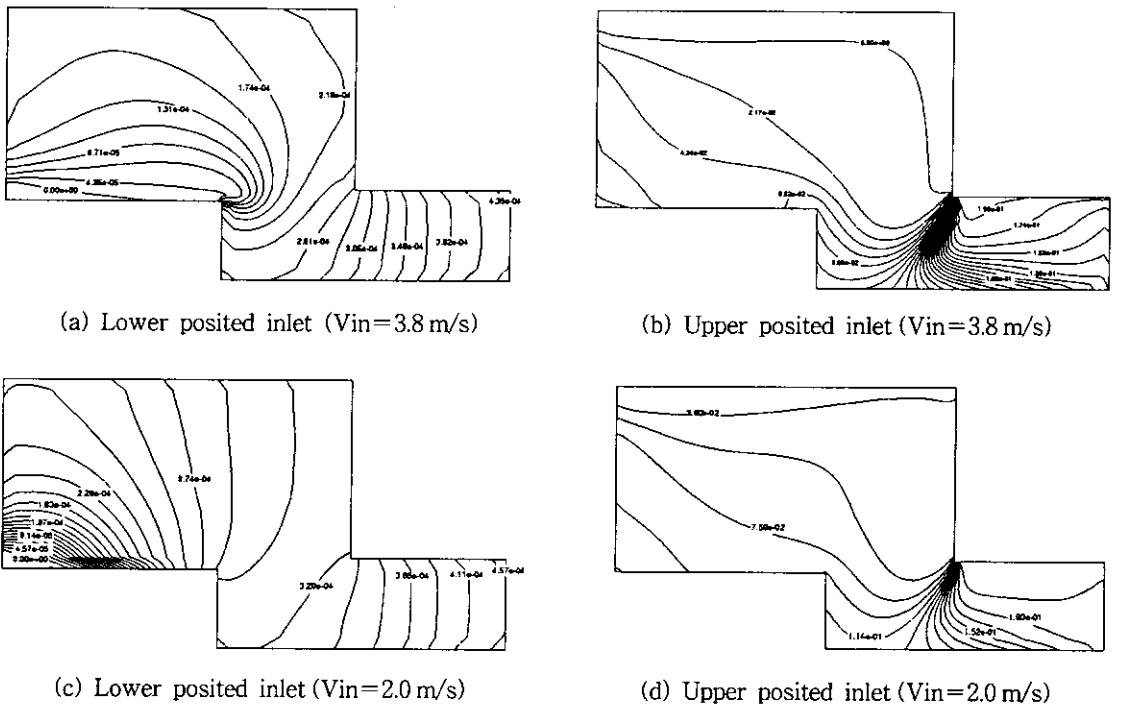


Fig. 3.4 CO₂-concentration distribution of x-z plane (at 150s).

이다. 실 전체에 $0.0 \sim 4.35 \times 10^{-4}$ 범위의 잔류 CO₂의 농도분포를 유지하여 실내공간의 대부분이 0에 가까운 CO₂ 농도분포 즉, O₂ gas로 완전히 대체되었음을 볼 수 있다. Fig. 3.4.(b)는 급배기구의 위치가 상부에 위치했을 때의 오염물질 CO₂의 농도분포를 보여주고 있다. 실 전체에 CO₂ gas가 충만한 상태에서 급기구를 통하여 O₂ gas를 공급하였을 경우 화학적 반응없이 단지 확산 및 유체유동에 의해 배기구를 따라 감소되는 CO₂ 농도분포를 무차원화하여 보인 것이다. 특

히, Fig. 3.4.(c) 경우 유속을 2.0 m/s로 유지하면서 급배기구의 위치를 하부에 위치시킨 결과 $0.0 \sim 4.57 \times 10^{-4}$ 범위의 잔류 CO₂의 농도분포를 보여 유속 3.8 m/s의 급배기구 상부 위치인 Fig. 3.4.(b)의 경우 농도분포 $0.0 \sim 1.96 \times 10^{-1}$ 의 결과보다 매우 양호한 환기효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 3.4.(d) 경우는 $3.80 \times 10^{-1} \sim 1.90 \times 10^{-1}$ 의 잔류 CO₂의 농도분포를 보여 실내의 오염공기가 상당량 잔존해 있음을 나타내고 있다. 불리한 급

배기구의 위치와 저속의 유동효과로 추가적인 환기가 요구되는 상태라 볼 수 있다.

4. 결 론

실내공간의 벽면을 통하여 신선외기 공급과 실내 오염공기 배출을 동시에 수행하는 혼합형 실내공기정화기를 적용한 단순 2차원 실내공간의 유동현상과 오염물질의 농도분포에 대한 해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 급배기구의 위치를 하부로 위치한 경우, 양호한 오염물질 감소를 나타내 CO₂ 농도가 유속 3.8 m/s에서는 $0.0 \sim 4.35 \times 10^{-4}$, 유속 2.0 m/s에서는 $0 \sim 4.57 \times 10^{-4}$ 를 보였다.

(2) 급배기구의 위치를 상부로 위치한 경우, 유속 3.8 m/s에서는 $0.0 \sim 1.96 \times 10^{-4}$, 유속 2.0 m/s에서는 $3.80 \times 10^{-4} \sim 1.96 \times 10^{-4}$ 의 잔류 CO₂의 농도 분포를 나타내어 급배기구를 하부에 위치했을 경우와 비교하여 현저히 낮은 환기효과를 보였다.

(3) 급배기구의 위치에 따른 실내 오염공기의 환기방법이 동력추가를 요구하는 급배기 유속 제어방법과 비교하여 매우 효율적임을 본 연구를 통하여 확인할 수 있었다.

(4) 효과적인 실내공기질 개선을 위해서는 건축물의 적정한 환기구조 설계와 공기청정장치의 최적의 운전조건을 해석과 실험을 병행하여 도출해 내야 한다. 따라서 다양한 공동주택의 기하학적 범위에 적용이 가능한 공기청정장치의 개발을 위해 실내공기유동의 해석적 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. SAREK, 1991, Handbook of Air Conditioning, Refrigeration and Sanitary Engineering, Vol. II, p. 252.
2. Hines, A. L., 1993, Indoor Air Quality and Control, PTR PrenticeHall, p. 3.
3. Park, J. C., 1994, A Study on the Improvement of Indoor Air Quality in Newly constructed Apartment Buildings, Ph.D. thesis, University of Joongang, Seoul, Korea.
4. Jang, M. S. and Lee, C. S., 1993, A Numerical Analysis of Contaminant Distribution in a Room with respect to Inlet, Outlet Shapes and Contaminant Generation Position, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 11, pp. 2876-2888.
5. Han, H. T., 1998, Numerical Analysis of local exhaust effectiveness using reverse flow calculation method, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 4, No. 8, pp. 658-665.
6. Han, H. T., 1992, Numerical Study of Ventilation Effectiveness using Turbulent Air-flow Modeling, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 4, No. 8, pp. 253-262.
7. Choi, C. W. and Jung, S. W., 1999, An Experimental Study on the Improvement of Indoor Air Quality in Apartment Buildings, KangNam Co., Incheon, Korea.
8. Fluent User's Guide, 1996, Volume 1, 2, 4, pp. 115-116.
9. Currie, I. G., 1993, Fundamental Mechanics of Fluids 2nd ed., McGraw-Hill, pp. 23-33.
10. Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill.
11. Kays, W. M. and Crawford, M. E., 1993, Convective Heat and Mass Transfer, 3rd ed., McGraw-Hill, p. 16.
12. ASHRAE., 1989, Ventilation for Acceptable IAQ, ASHRAE Standard 62.