

새집증후군 저감대책을 위한 실내 오염물질 확산 해석 코드 개발 및 적용

전 현 준, 양 경 수^{**}, 최 춘 범^{*}

인하대학교 기계공학과, *인하대학교 기계공학부

Development and Application of a Computer Code for Prediction of Indoor Pollutant Dispersion

Hyun-Jun Jeon, Kyung-soo Yang[†], Choon-bum Choi

Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

(Received June 15, 2010; revision received August 26, 2010)

ABSTRACT: An efficient code has been developed to predict dispersion of indoor air pollutants. The computing capability of the code has been compared with that of a commercial code in a benchmark test. After that, the code has been employed to compute dispersion of a pollutant released from a new furniture, a kind of Sick Building Syndrome(SBS). A sofa which generates formaldehyde is implemented by using an immersed boundary method. Large Eddy Simulation (LES) is employed to obtain time-dependent velocity and concentration fields. LES has been regarded as an academic tool, but the newly-developed code reveals a possibility of application of LES to practical problems, especially dispersion of indoor pollutants.

Key words: Immersed boundary method(가상경계법), LES(Large eddy simulation), Indoor pollutant dispersion(실내오염물질확산), Sick building syndrome(새집증후군)

기 호 설 명

Re : Reynolds number, UH/ν
 Sc : Schmidt number, ν/D
 D : 공기와 오염물질 간의 분자 확산계수
 h : 열전달계수 [W/m^2K]
 k : 열전도계수
 C : 농도
 θ : 무차원화된 온도($= (T - T_\infty)/(T_s - T_\infty)$)
 Pr : Prandtl number, ν/α
 N : Nusselt number, hH/k
 H : 채널의 높이
 q_w : 균일한 열유속

T_w, T_f : 벽면온도 및 유체온도

그리스 문자

ν : 동점성 계수
 α : 열확산 계수

상첨자

- : 시간 평균

하첨자

∞ : 유입
 s, w : 표면

[†] Corresponding author

Tel.: +82-032-860-7322; fax: +82-032-868-1716

E-mail address: ksyang@inha.ac.kr

1. 서 론

‘새집증후군’(Sick-House Syndrome, SHS)은 최근 몇 년 사이 국민보건과 관련하여 가장 주목받은 관심사 중 하나이다. 새집증후군이 최근에 더욱 문제시되고 있는 이유는 주택의 기밀성과 밀접한 관계를 가지고 있다. 냉난방 시 에너지 절감을 위해 최근 건축물의 기밀성이 상당히 높아졌기 때문에 자연환기만으로 원하는 환기량을 충족시킬 수 없다. 이러한 이유로 최근의 환기관련 산업의 발전이 두드러지고 있다.^(1,2) 한편, 건축자재에서의 오염물질 방출량은 온도에 상당히 민감한 것으로 최근 연구에서 밝혀지고 있다.^(3,4) 측정 당시 20°C 이상을 유지해야 한다는 환경부 기준을 만족시키더라도 40°C에 육박하는 한여름엔 오염물질에 무방비 상태가 될 수밖에 없다. 학계에서도 ‘새집증후군’의 심각한 폐해를 인식하고 실제 새집이나 사무실에서 오염물질을 측정하는 논문들이 국내외에서 활발히 발표되고 있으며, 상용코드를 이용한 연구 역시 다양하게 이루어지고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

이와 같이 ‘새집증후군’과 관련된 다양한 연구들이 수행되고 있으나, 기존의 실내 오염물 확산에 대한 연구는 한정된 지점에서 직접 측정에 의한 방식에 의해 이루어졌으며 최근에 들어서야 컴퓨터의 발달로 인해 수치해석이 활발히 이루어지고 있다. Kim and Yee⁽⁸⁾는 공동주택 환기장치류 가동특성에 따른 실내공기질 변화특성에 관한 연구를 수행하였으며 Choi and Cho⁽⁹⁾는 실내 공기유동에 관한 연구를 진행한 바 있다. 그러나 이러한 수치해석 연구들은 RANS 방식에 국한되어 있는 것이 현실이며, 오염물의 시간에 따른 다양한 확산 현상을 예측하지 못하는 결정적인 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 최신의 수치해석 기법들이 구현된 새집증후군 저감 대책을 위한 실내 오염물질 확산해석용 코드를 개발하였다.

본 연구에서 개발된 새집증후군 저감 대책을 위한 실내 오염물질 확산해석 코드는 높은 레이놀즈수의 유동을 효율적으로 계산하기 위해 LES 기법이 사용되었으며 최근에 발표된 Lagrangian-averaged scale-invariant dynamic subgrid-scale model⁽¹⁰⁾을 사용하여 형상이 비균질한 복잡한 물체 주위에서의 유동을 보다 정확히 계산할 수 있도록 하였다. 또한 격자에 구애받지 않고 복잡한 물체를 형상화하기 위해 가상경계법^(11,12)을 적용하였다. 개발된 코드는 채

널 사이에 직사각형 실린더가 있는 형상에서의 난류 열전달 문제에 대해 기존의 실험 데이터와 비교, 검증하였다. 검증을 완료한 후, 최근에 이슈가 되고 있는 새 가구(furniture)로부터의 오염물질 방출에 의한 SHS 문제⁽¹³⁾를 대상으로, 공동주택(아파트)에 놓인 소파로 모델링하여 오염물질(여기서는 폼알데히드로 설정)의 시공간적인 확산을 해석하였다.

2. 수치해석 방법

본 연구에서는 지배방정식으로 상자필터(box filter)를 사용하여 여과된(filtered) 3차원 비압축성 연속방정식과 운동량 방정식, 에너지 방정식을 사용하였다. 또한 사각 실린더 형상을 구현하기 위해 가상경계법⁽¹¹⁾이 사용되었다. 가상경계법과 LES를 동시에 적용한 지배방정식은 아래와 같다.

$$\overline{\frac{\partial u_j}{\partial x_j}} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \overline{C}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{C u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{1}{\text{Re Sc}} \frac{\partial \overline{C}}{\partial x_j} - q_j \right] + F \quad (3)$$

여기서, $\overline{u_i}$ 는 x_i 방향으로의 속도성분, P는 압력성분, τ_{ij} 와 q_j 는 아격자응력성분과 아격자질량확산항을 나타낸다. f_i 와 F는 각각 운동량 부가^(11,12)와 농도 원천/흡입을 나타낸다. τ_{ij} 와 q_j 의 모델링에는 Smagorinsky의 점성모델(eddy viscosity model)이 사용되었으며 난류모델은 Lagrangian Dynamic Subgrid-scale Model(LDSM)^(10,14)을 사용하였다.

3. 검 증

오염물질 농도의 이송방정식과 열전달 문제에서의 온도의 이송방정식이 수학적으로 정확히 같은 형태이며 명확하게 정의된 상황에서 시공간적으로 측정된 신뢰도가 높은 물질전달 측정데이터를 찾을 수 없었기 때문에 실험데이터가 풍부한 열전달 문제를 대상으로 코드를 검증하였다. 본 검증에서는 채널 사이에 실린더 형 장애물이 존재할 경우의 채널 면에서의 열전달 특징에 대하여, Nakagawa et al.의 실험결과⁽¹⁵⁾와 본 코드의 결과를 비교하였다.

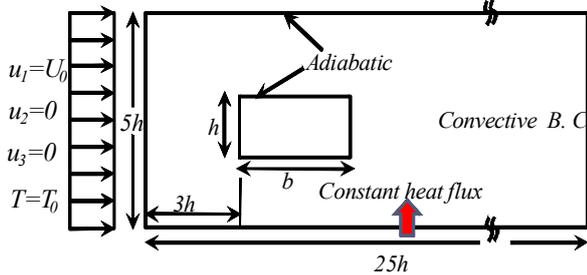


Fig. 1 Schematic of flow configuration and boundary conditions.

경계조건과 열 방출 위치를 Fig. 1에 자세히 나타내었다.

지배방정식은 식(1)~식(3)에서 C 는 θ 로, Sc 는 Pr 로 각각 대체된 무차원식이다. 모든 변수들은 균일한 입구속도 U_0 와 실린더 높이(h)로 무차원 되었다. b 는 실린더의 유동방향 길이이다. 위 지배방정식은 유한 체적법을 사용하여 차분되었고, 비균일 엇갈린 격자계가 사용되었다. 채널 벽과 실린더 근처에서는 $0.01 h$ 의 최소격자를 사용하였으며, 사용된 격자수는 주유동 방향, 수직방향, 횡방향으로 각각 $464 \times 192 \times 64$ 개의 격자를 사용하였다. 검증에 사용된 Re 는 U_0 와 h 를 기준으로 3000 으로 고정하였고, $Pr = 0.71$ 이다. 채널 높이와 횡방향 계산영역은 $5h$, h 를 사용하였으며, 균질한 횡방향으로는 주기 조건을 사용하였다. 출구에서는 대류경계 조건을 사용하였으며, 모든 고체 벽에서는 점착조건을 적용하였다. 온도장에 대한 경계조건으로 실린더표면과 채널 위쪽 벽에서는 단열조건을 사용하였으며, 채널 입구에서는 균일한 입구온도(T_0)를 사용하고, 출구에서는 대류경계조건을 적용하였다. 채널 바닥 벽에서는 균일한 열유속(q_w)을 경계조건으로 사용하였다. Fig. 2는 채널 바닥에서 시간 평균된 Nu 의 변화를 실험결과⁽¹⁵⁾와 비교한 그림이다. 채널 입구에서

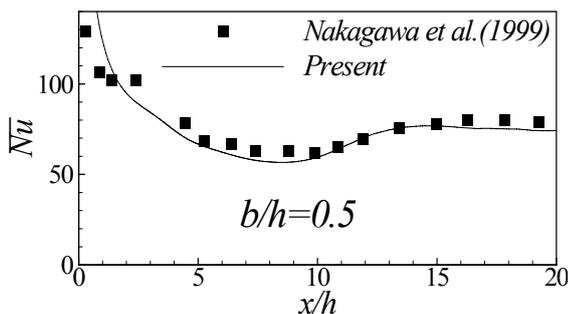


Fig. 2 Comparison with experimental results.⁽¹⁵⁾

균일한 입구유동이 후류로 가면서 경계층이 발달하게 되며, 채널 입구 근처에서는 유동과 열 경계층이 발달하지 못하여 높은 Nu 를 가지게 된다. Fig. 2에서 Nakagawa et al.의 실험결과⁽¹⁵⁾와 잘 일치하는 것으로 본 코드의 타당성을 검증하였다.

4. 확산해석코드개발 결과

4.1 본 코드와 상용코드(CFX)와의 성능비교

기존의 연구⁽⁹⁾에서 고려된 상황을 해석할 대상으로 선정하였다. 천장에 급·배기구가 각각 1개씩 설치되어 있으며 급·배기구의 위치가 도시된 천장의 단면을 Fig. 3에 나타내었다. 급·배기구는 한 변의 길이가 $0.3 m$ 인 정사각형이고, 급기구의 유량은 $0.082 m^3/s$ 이다. 방의 크기는 x 방향으로 $4.5 m$, y 방향으로 $5.5 m$, z 방향으로 $3 m$ 이다. z 방향은 바닥면으로부터의 높이를 의미한다. 본 코드에서 사용된 격자는 $64 \times 112 \times 112$ 개이고 상용코드에서 사용된 격자는 약 80 만 개로 거의 같다.

본 코드의 초기조건은 CO_2 의 농도 $1,000 ppm$, $u_i = 0$ 이고 급기구에서는 CO_2 의 농도 $350 ppm$ 으로 Dirichlet 경계조건을 주었다. 배기구에서는 유동장과 농도장에 대해 대류경계조건을 사용하였다. 급·배기구를 제외한 모든 벽면 조건은 유동장에 대해 no-slip, 농도장에 대해 no-flux조건을 사용하였다. Sc 는 공기와 CO_2 간의 분자확산 계수를 기준으로 0.9375 이다. 상용코드의 초기조건 및 급기구의 조건은 본 코드와 같으며 배기구에서는 opening 조건을, 모든 벽면에 대해서는 wall boundary 조건을

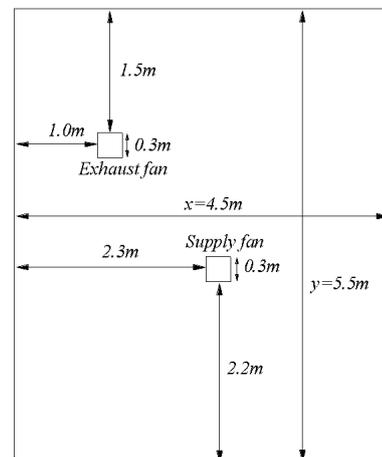


Fig. 3 Location of supply fan and exhaust fan.

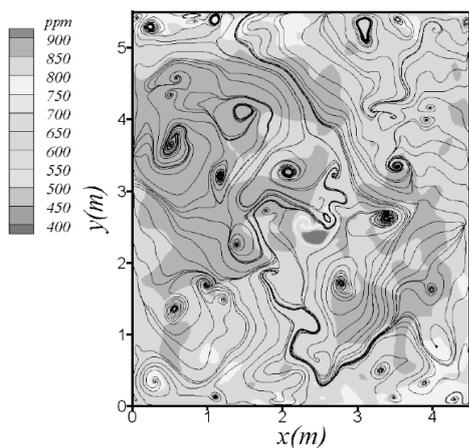
사용하였다. 상용코드 계산에 사용된 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델이다. 동일 시간($t = 200$ 초)에서 지상으로부터 1.5 m 높이에서의 $x-y$ 단면에 대한 순간 유동장에 의한 유선과 순간 농도장을 contour로 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4(a)는 본 코드로 계산된 결과이고 Fig. 4(b)는 상용코드로 계산된 결과이다. Contour level은 Fig. 4(a)는 ppm으로, Fig. 4(b)는 Volume fraction으로 표기되었다. Volume fraction에 10^6 을 곱하면 ppm이 된다. 먼저 와류구조를 살펴보면 Fig. 4(a)의 와류구조가 Fig. 4(b)의 와류구조보다 복잡한 것을 알 수 있다. 이는 본 코드가 상용코드보다 작은 스케일의 eddy들을 더 잘 해상할 수 있음을 의미한다. LES는 RANS 방식의 해법보다 상대적으로 난류모델링 의존도가 적어 보다 정확한 유동장을 구할 수 있다. 정확한 유동장의 계산은 곧 정확한 농도장의

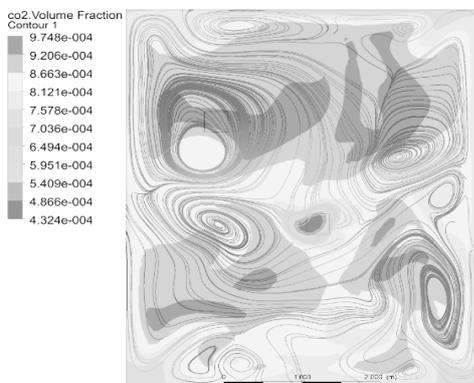
계산 결과로 이어지기 때문에 작은 스케일의 유동모사는 매우 중요하다. 두 계산결과에서 농도장의 분포가 다른 것을 확인할 수 있는데 이는 유동장의 차이가 농도장의 차이로 이어진 것으로 볼 수 있다. 또한 동일 격자수에서 Simulation 시간 200초까지 계산에 필요한 CPU 시간은 각각 36시간, 203시간으로 계산 속도는 본 코드가 상용코드에 비해 5배 이상 빠르다. 따라서 본 코드는 정확하고 신속한 실내오염물질 거동의 관찰을 가능하게 할 것으로 사료된다.

4.2 새 가구에 의한 오염물질 확산 해석

제 4.1절과 같은 조건에서 오염원을 방출하는 소파가 위치한 강제 환기 공간을 구현하여 실내오염물질 확산의 거동을 관찰하였다. 소파는 $x = 1.0 \sim 2.6$ m, $y = 0.0 \sim 0.8$ m, $z = 0.1 \sim 0.8$ m의 공간에 위치하며 구현하지 않은 소파의 다리높이 0.1 m(z 방향)가 고려되었다. 소파에서 방출되는 오염물질은 폼알데히드라 가정하였고, 소파부근에서의 정확한 유동장 및 농도장 계산을 위해 제 4.1절에서 사용된 격자수 보다 많은 $96 \times 128 \times 128$ 개의 격자를 사용하



(a) Present



(b) CFX

Fig. 4 Streamlines of instantaneous velocity field and contour of instantaneous concentration field.

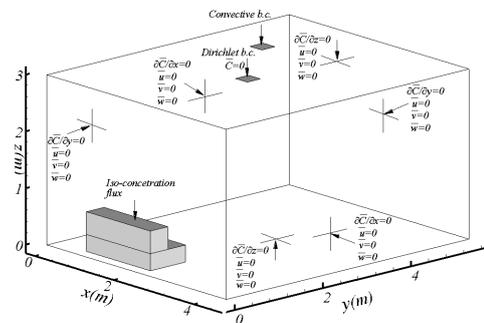


Fig. 5 Indoor configuration, boundary condition and initial setting.

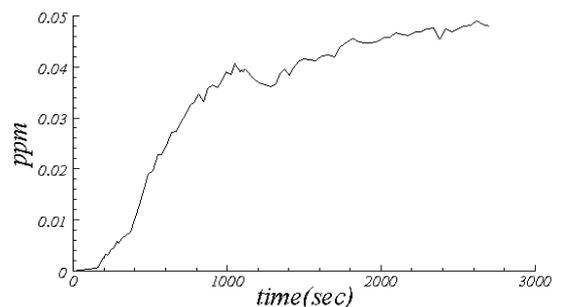


Fig. 6 Spatially averaged concentration at $z = 1.5$ m.

였다. 초기조건은 $\bar{C} = 0$, $\bar{u}_i = 0$ 이고, 급기구에서는 Dirichlet 경계조건으로 $\bar{C} = 0$, 즉 신선한 공기가 급기된다. 경계조건 및 소파를 나타낸 실내의 투시도를 Fig. 5에 나타내었다. 소파에서의 방출량은 한국 건설기술연구원의 자료⁽¹⁶⁾를 참고하여 $1.690\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 로 주었으며, Sc 는 공기와 폼알데히드 간의 분자확산 계수를 기준으로 0.9803이다.

바닥면으로부터 1.5 m 높이에서의 시간의 변화에 따른 면 평균 폼알데히드의 ppm을 Fig. 6에 나타내었다. 농도는 1000초 정도까지 급격히 상승하다가 그 이후 안정화 되어가는 양상을 보이고 있는데, 이를 바탕으로 1000초부터 샘플링을 시작하였다. 샘플링은 0.2초의 시간간격으로 총 6000개의 샘플을 모아 통계처리 하였다.

평균 유동장에 의한 유선과 표준화된 평균 농도장 contour의 단면을 Fig. 7~Fig. 9에 나타내었다. 각 그림에서 화살표 방향은 유동의 방향을 나타낸다. 표준화된 평균 농도값 s 는 $s = CU/N''$ 으로 정의되며 U 와 N'' 은 각각 급기구에서의 평균속도, 소파에서의 molar flux($\text{mole}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)를 나타낸다.

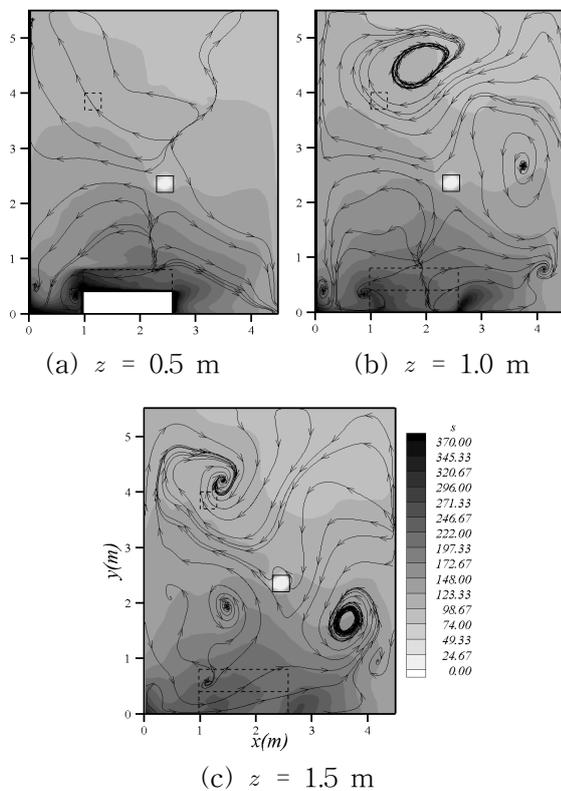


Fig. 7 Streamlines of time-averaged velocity field and contour of time-averaged concentration field.

Fig. 7(a)~Fig. 7(c)는 각각 바닥면으로부터 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m 높이에서의 $x-y$ 단면이고, 각 높이는 재실자가 바닥에 앉은 경우, 소파에 앉은 경우, 서있는 경우의 높이에 해당된다. 각 단면에서 소파의 단면을 포함하는 경우에는 실선으로 흰색을 채워 표시하였고, 투영면의 경우 점선으로 나타내었으며 급기구와 배기구의 위치를 각각 실선과 점선으로 나타내었다. 이는 Fig. 8, Fig. 9에 대해서도 동일하게 적용하였다.

Fig. 7(a)~Fig. 7(c) 모두에서 소파부근에서의 높은 농도분포가 확인된다. 이로써 소파에서 방출되는 오염물질의 확산이 수평방향으로 잘 이루어지지 않고 주로 수직방향으로 이루어지고 있음을 알 수 있다. Fig. 8(a), Fig. 8(b)는 각각 $y = 2.35 \text{ m}$, $y = 3.85 \text{ m}$ 에서의 $x-z$ 단면이며, y 의 각각의 위치는 급기구, 배기구를 포함한 단면에 해당된다. Fig. 8(a)에서 급기구에서의 하강기류가 바닥에 부딪힌 후 수평방향으로 퍼져나가다 다시 벽면에 부딪힌 다음 벽면을 따라 상승하는 것이 확인된다. 또한 Fig. 8(a), Fig. 8(b)에서 급기구 지점을 기준으로 형성되

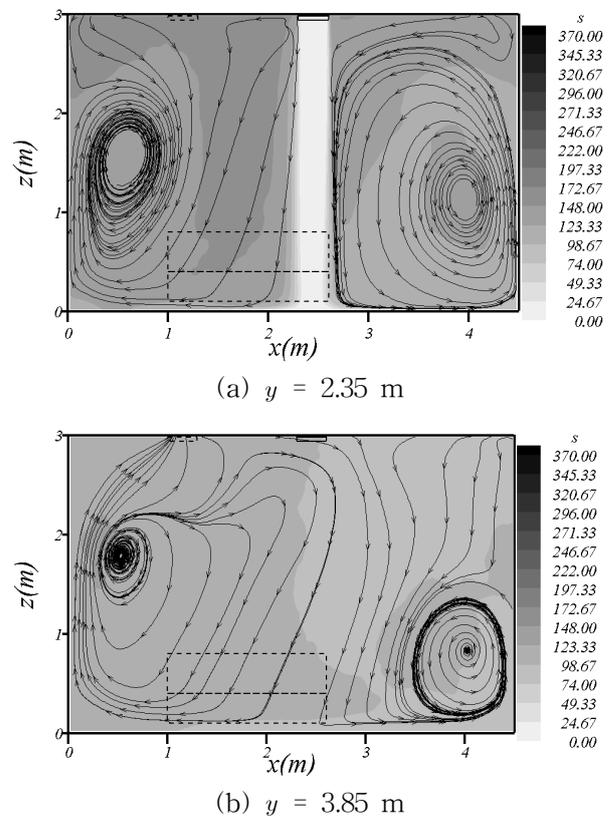


Fig. 8 Streamlines of time-averaged velocity field and contour of time-averaged concentration field.

는 한 쌍의 지배적인 와류구조를 볼 수 있다. 이로써 벽면에 인접한 공간에서는 상승기류가 지배적임을 알 수 있다. Fig. 9(a), Fig. (b)는 각각 $x = 2.45$ m, $x = 1.15$ m에서의 $y-z$ 단면이며 x 의 각각의 위치는 급기구, 배기구를 포함한 단면에 해당된다. Fig. 9(a), Fig. 9(b)의 두 단면은 모두 소파의 단면을 포함한다. Fig. 9(a)에서는 소파부근에서의 유동이 큰 와류의 발생 없이 아래를 향하고 있는 반면, Fig. 9(b)에서는 소파부근에서 와류가 형성되는 것을 볼 수 있다. 이 와류는 Fig. 9(b)에서 소파가 x 방향 벽면에 가깝게 위치하여 상승기류의 영향을 많이 받게 되는데 이 상승기류가 소파 쪽으로의 하강기류와 만나면서 형성되는 것이다. 상대적으로 x 방향 벽면에서 멀리 떨어진 Fig. 9(a)의 단면에서는 소파부근에서 상승기류의 영향이 작아 Fig. 9(b)에서 보이는 와류의 형성이 이루어지지 않고 있다. 이러한 차이로 인해 Fig. 9(a), Fig. 9(b)의 소파부근에서의 농도확산거동이 다른 것이다.

Fig. 10은 평균농도장의 등 농도면(0.078 ppm)을 나타낸 것이다. 오염물질의 확산이 주로 수직방향으로 이루어지고 있음은 Fig. 7과 같다. 소파가 x 방향 벽면과 가까운 부분에서 상승기류의 영향을 더

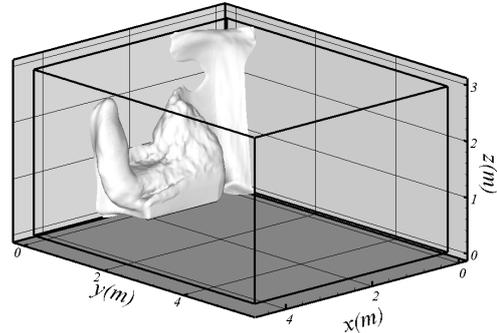


Fig. 10 Iso-surface of mean concentration (0.078 ppm) around a sofa.

많이 받기 때문에 소파를 기준으로 좌우측부분의 오염물질 확산거동이 대칭적이지 않음을 알 수 있다. 소파로부터의 배기구까지의 거리가 급기구까지의 거리보다 멀고 실내유동장이 급기구에서의 하강기류에 의한 영향을 많이 받아 오염물질이 외부로 잘 배출되지 못하고 있음을 알 수 있다.

4.3 배기구 위치에 따른 환기효과

제 4.2절에서 새 가구에 의한 오염물질 확산 해석을 수행한 결과 소파로부터 방출된 오염물질의 확산이 수직방향으로 이루어지고 있어 실외로의 배출이 잘 이루어지지 않음을 확인하였다. 이번 절에서는 배기구의 위치를 변화시켜가며 그에 따른 환기 효과에 대해 살펴보고자 한다. 소파의 위치 및 오염물질 방출량, 급기구 위치, 초기조건 및 경계조건은 제 4.2절의 해석에 사용된 조건과 동일하다. 기존 제 4.2절에서 고려되었던 소파의 다리 높이는 고려하지 않은 대신에 등받이와 y 방향 벽면과의 4 cm의 공간을 고려하였다. 배기구가 $y = 5.5$ m, $y = 0$ m의 $x-z$ 단면의 중앙에 위치한 것을 각각 출구조건 1, 2라 하였고, $x = 4.5$ m, $x = 0$ m의 $y-z$ 단면의 중앙에 위치한 것을 각각 출구 조건 3, 4라 하였다(총 4가지 경우). 이를 나타낸 실내의 투시도를 Fig. 11에 나타내었으며 정확한 출구좌표 정보를 Table 1에 표기하였다. 각 출구위치에 대한 시간대에 따른 바닥면으로부터 1.5 m 높이에서의 면 평균된 폼알데히드의 농도 변화를 Fig. 12에 나타내었다. 환기가 잘 이루어지는 순은 출구 위치 2 > 출구위치 3 > 출구위치 4 > 출구위치 1이며, 소파의 중심으로부터 배기구까지의 거리의 순은 출구위치 2 > 출구위치 4 > 출구위치 3 > 출구위치 1이다. 이는 환기효율이 단순히 오염원과 배기구와의 거리에 의해

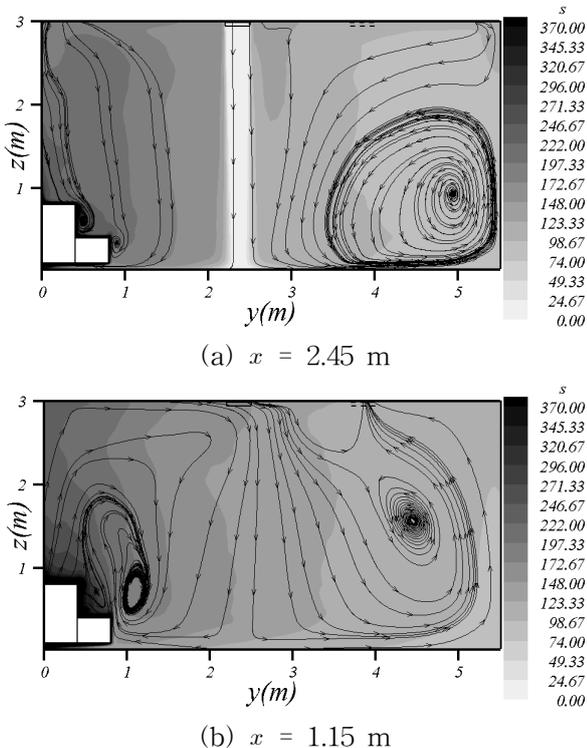


Fig. 9 Streamlines of time-averaged velocity field and contour of time-averaged concentration field.

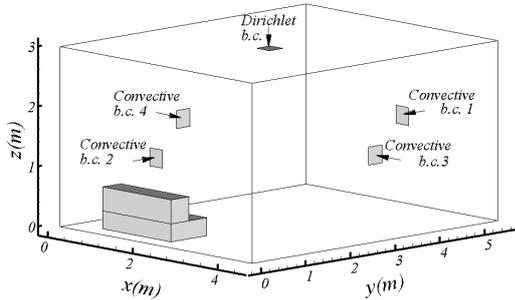


Fig. 11 Indoor configuration, boundary condition.

Table 1 Location of exhaust fan

중심좌표	x좌표	y좌표	z좌표
출구위치 1	2.35 m	5.5 m	1.45 m
출구위치 2	2.35 m	0.0 m	1.45 m
출구위치 3	4.5 m	2.75 m	1.45 m
출구위치 4	0.0 m	2.75 m	1.45 m

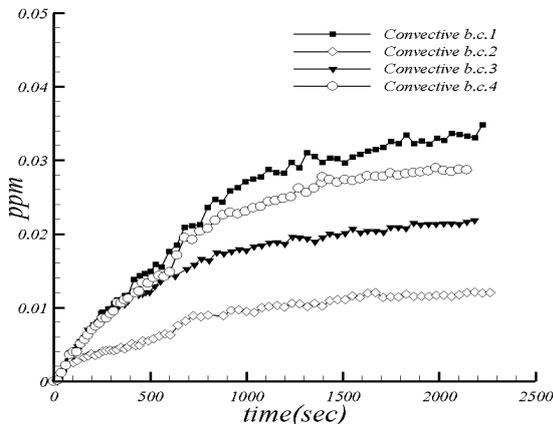


Fig. 12 Spatially averaged concentration at $z = 1.5$ m.

결정되는 것이 아님을 뜻한다. 농도의 확산은 유동의 양상에 따라 지배적으로 영향을 받게 된다. 제 4.2절에서의 해석에서 소파근처에서의 방출된 오염물질은 유동이 흐르는 방향으로 확산되는 것을 관찰하였다. 이때 유동이 흐르는 방향, 즉 농도가 확산되어 가는 쪽에 배기구가 위치할 경우 오염물질이 실내에서 확산되기 이전에 실외로 배출되어 환기가 잘 된다. 즉 급기 → 오염원 → 배기로의 유동 경로가 확보되었을 때 환기가 잘 된다. 또한 출구위치 2와 출구위치 3을 비교해 보았을 때 두 경우 모두 급기 → 오염원 → 배기로의 유동 경로가 확보되어 있지만 많은 차이를 보이게 되는데, 출구위치 2

의 경우 소파와 배기구와의 거리가 상대적으로 가까워 소파에서의 오염물질 확산이 이루어지기전에 바로 배기구로 배출되기 때문이다. 출구위치 3의 경우 유동의 방향에 배기구가 위치하지만, 배기구로 오염물질이 전달되는 동안에도 여러 방향으로의 농도확산이 이루어지게 되어 출구위치 2의 경우보다는 환기효율이 떨어지게 된다.

따라서 급기 → 오염원 → 배기로의 유동 경로가 확보된 경우에 한해, 오염원과 배기구와의 거리가 가까울수록 환기에 유리하다고 말할 수 있다. 본 연구에서는 배기구의 위치를 변화시켜가며 오염물질의 확산거동을 관찰하였으나, 실제로 실내에 설치된 배기구의 위치를 옮기는 것은 비현실적이다. 그러나 위와 같은 연구결과에 입각하여 보면 급·배기구의 위치가 고정되어 있더라도, 급기 → 배기로의 유동 경로 사이에 새 가구를 위치시킴과 동시에 배기구에 최대한 가깝게 위치시킴으로써 환기효율 상승을 가져올 수 있을 것으로 사료된다.

4.4 오염물질 방출량에 관한 현 권고기준 검토

환경부에서는 2004년 2월부터 친환경 건축자재 품질인증제⁽¹⁷⁾를 시행해왔다. Table 2는 환경부 보도자료⁽¹⁷⁾에서 발췌한 건축자재 인증등급별 방출량을 나타낸 표이다. 본 절에서는 Table 2에 표기된 5가지 등급에 해당되는 폼알데히드의 방출량을 토대로, 공동주택 및 다중이용시설에 대한 실내 기준치를 만족하는지에 대한 simulation을 시도하였다. 환기가 잘 되지 않는 악 조건에서도 실내 기준치는 만족되어야 한다. 따라서 제 4.3절에서 시행한 출구의 위치변화에 따른 환기효과 Simulation 결과 중 가장 환기효율이 떨어지는 출구위치 1의 경우를 고려하였다.

본 연구에서는 공동주택에서 실내공기 중에 포함되어 있는 휘발성유기화합물(VOCs)과 폼알데히드(HCHO)의 농도를 측정하는데 사용되는 환경부 공정시험방법⁽¹⁸⁾을 모사하였다. 앞 절에서 수행되었던 오염물질 확산거동을 관찰한 결과 실내 오염원 및 급·배기구의 위치에 따라 농도분포의 양상이 달라지므로 실측에서 얻은 특정지점의 농도가 실내 오염농도 기준치를 만족하더라도 기준치를 초과하는 영역은 얼마든지 존재할 수 있다. 하지만 실측방법의 경우 모든 지점에서의 측정은 불가능하므로 1.2 ~ 1.5 m의 높이를 기본 측정 점으로 국한하고 있으

Table 2 Grade of Building Materials
단위(mg/m²h)

구 분	일반자재	페인트	접착제
최우수	TVOC	0.10미만	0.10미만
	HCHO	0.03미만	0.03미만
우수	TVOC	0.10이상~0.2미만	0.10이상~0.2미만
	HCHO	0.03이상~0.05미만	0.03이상~0.05미만
양호	TVOC	0.20이상~0.40미만	0.20이상~0.40미만
	HCHO	0.05이상~0.12미만	0.05이상~0.12미만
일반	TVOC	0.40이상~2.00미만	0.40이상~2.00미만
	HCHO	0.12이상~0.60미만	0.12이상~0.60미만
일반	TVOC	2.00이상~4.00미만	2.00이상~4.00미만
	HCHO	0.60이상~1.25미만	0.60이상~1.25미만

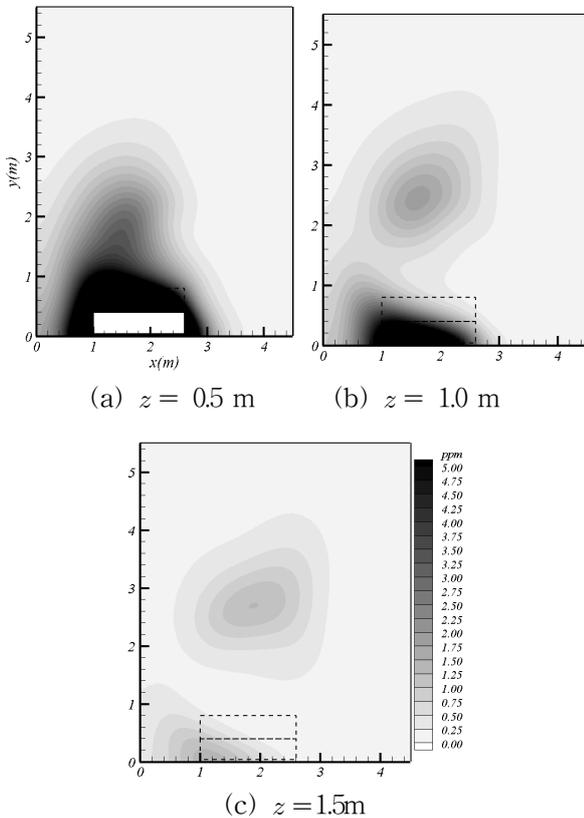


Fig. 13 Contour of time-averaged concentration field.

나 본 연구에서 개발된 코드로는 실시간 농도를 모든 공간에 대해 쉽게 확인할 수 있기 때문에, 기존 실측정법이 갖는 한계를 극복해내고 보다 정확한 실내 오염정도를 판단할 수 있다.

30분 이상의 환기 후 급·배기구를 중단하고 밀폐 후 5시간이 지난 후 부터 4.5초 간격으로 30분간 400개의 샘플을 채취하여 통계처리 하였다. 오염원에서의 방출량은 앞 절에서 수행된 Simulation에서

소과의 방출량과 같은 1.69mg/(m²·h)이다. 이의 x-y단면에 대한 평균 농도장을 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13(a)~Fig. 13(c)는 각각 바닥면으로부터 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m의 x-y단면에 해당한다. 폼알데히드의 공동주택에서의 기준치는 약 0.2 ppm이다. 환경부 기준에 입각하여 1.5 m에서의 농도를 기준으로 봤을 때 실내오염 권고 기준치를 5배 이상 초과하는 영역이 존재한다.

오염원이 바닥에 위치한 경우에는 높이에 따라 오염물질의 농도가 많은 차이를 갖게 된다(Fig. 13). 특히 오염원 주위에서의 오염물질의 농도는 심각한 수준으로 높다(Fig. 13(a), Fig. 13(b)).

Table 2에서 일반자재에 해당하는 5가지 인증등급의 폼알데히드 범위의 중간 값으로 오염물질 방출량을 선택하고 각각의 방출량에 대한 Simulation 결과를 Table 3에 나타내었다. 목재소과의 경우 Table 2의 일반자재에 대한 등급을 적용할 수 없으므로 본 절의 해석에서 오염원은 소과의 형상을 갖는 일반자재(건축자재 인증등급을 적용할 수 있는)로 만들어진 물체로 가정하였다. 측정농도 값은 1.2~1.5 m 내에서 시료를 채취하는 점에 입각해, 범위의 중간높이 지점인 1.35 m의 중앙지점에서 계산된 농도 값으로 표기하였다.

Table 3에서 보는 바와 같이 최우수, 우수, 양호의 등급에 해당되는 자재를 사용한 소과의 경우 실내 오염 권고 기준치를 만족하였고, 일반 1의 경우는 권고 기준치 소량 초과, 일반 2의 경우에는 권고 기준치를 상당히 초과하였다. 본 연구에서 개발된 코드로의 Simulation이 타당하게 이루어졌음을 알 수 있고, 동시에 법적기준 역시 타당하게 정의되어 있음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 13에서 보듯이 밀폐 후 5시간이 지났음에도 불구하고 실내농도의 완전 확산이 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 품질인증제에서 시료채취는 바닥면으로부터 1.2~1.5 m 사

Table 3 Simulation result(Environment recommendation : 0.2ppm)

구 분	선택방출량 (mg/m ² ·h)	농도값 (ppm)	결 과
최우수	0.02	0.014	기준치 만족
우수	0.04	0.028	기준치 만족
양호	0.08	0.056	기준치 만족
일반1	0.36	0.25	기준치 소량초과
일반2	0.92	0.64	기준치 초과

이에서 이루어지는 것으로 되어있는데, 그 영역에서 실내 기준치를 만족하는 오염원이 놓여 있더라도 다른 영역에서는 실내 기준치를 상당량 초과할 수 있다. 따라서 1.2~1.5 m로 단순히 정해 놓기 보다는 그 기준점을 오염원으로 부터의 일정 거리로 취하는 것이 좀 더 현실적인 방법일 수 있다. 또한 밀폐 후 5시간이 지났음에도 불구하고 실내농도의 완전확산이 이루어지지 않았기 때문에 밀폐하는 시간을 좀 더 늘리는 것도 하나의 현실적인 대안이 될 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 실내 오염물질에 의한 피해를 줄이기 위해 최신의 수치해석 기법들이 구현된 실내 오염물질 확산해석용 코드를 개발하고 실내 오염물질 확산의 거동을 깊이 있게 살펴보았다. 채널 사이에 실린더형 장애물이 존재할 경우, 바닥에서의 열 전달 계산을 통해 기존의 실험결과와 일치하는 것으로 본 코드의 정확성을 검증하였다. 개발된 코드를 사용하여 몇 가지 시뮬레이션을 시도하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 기존의 연구에서 고려된 상황을 해석할 대상으로 선정하여 본 코드와 상용코드로 계산된 결과를 비교하였다. 본 코드의 계산결과에서 상용코드의 결과에서 볼 수 없는 작은 스케일의 와류를 관찰할 수 있었다. 이는 RANS 해법에 비해 난류모델링의 의존도가 적은 LES 해법의 장점이다.

(2) 새 가구에 의한 오염물 확산에 대해서 살펴보았다. 급기구에서의 강한 하강기류에 의한 실내유동장 및 적절하지 못한 배기구의 위치 등에 의해 소파에서 방출된 오염물질의 실외로의 배출이 잘 이루어지지 않음을 확인 하였다. 이의 개선을 위해 배기구의 위치를 변화시켜가며 이에 따른 환기효과를 관찰하였다. 그 결과 급기 → 오염원 → 배기로의 유동 경로가 확보되었을 때 환기 효율은 상승하게 되고 이 경우에 한해 오염원과 배기구와의 위치가 가까울수록 환기에 유리한 것을 알 수 있었다.

(3) 환경부에서 시행중인 친환경 건축자재 품질인증제에 제시된 각 등급별 일반자재에서의 폼알데히드 방출량이 적절한지에 대한 검토가 이루어졌다. 밀폐 후 5시간이 지났음에도 불구하고 실내농도의 완전확산이 이루어지지 않았다. 따라서 시료채취가 이루어지는 공간을 바닥면으로부터 1.2~1.5

m로 단순히 정해 놓기 보다는 그 기준점을 오염원으로 부터의 일정 거리로 취하는 것이 좀 더 현실적인 방법일 수 있다. 또한 밀폐하는 시간을 좀 더 늘리는 것도 다른 대안이 될 수 있다.

본 연구의 해석결과를 통해 기존에는 학술 연구 단계에 머물렀던 LES 기법이 다양한 공학적 문제에 효율적으로 적용될 수 있음을 보여주었다. 본 연구를 통해 개발된 코드는 앞으로 실내 오염물질 확산 해석을 위해 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2009-0070743).

참고문헌

1. Reduction of the Sick House Syndrome with the ventilation system, 2006, Korean Intellectual Property Office News.
2. <http://www.kipo.go.kr>.
3. Wiglusz, R., Sitko, E., Nikel, G., Jarnuszki-ewicz I. and Igelska, B., 2002, The effect of temperature on the emission of formaldehyde and Volatile Organic Compounds (VOCs) from laminate flooring—case study, *Building and Environment*, Vol. 37, pp. 41–44.
4. Zhang, Y., Luo, X., Wang, X., Qian, K. and Zhao, R., 2007, Influence of temperature on formaldehyde emission parameters of dry building materials, *Atmospheric Environment*, Vol. 41, pp. 3203–3216.
5. Wang, H. and Morrison, G., 2007, Ozone-initiated secondary emission rates of Aldehydes from indoor surfaces in filed homes : surface aging and regeneration, *A&WMA's 100th Annual Conference*, Pittsburgh, PA.
6. Kim, K. H. and Rhee, E. K., 2003, A study on Ventilation Effectiveness of Mechanical Ventilation System in Apartment Buildings, *Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference*, pp. 537–542.

7. Yi, S. H., 2006, A study of Hybrid Ventilation System applying to an Apartment House, Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference, pp. 1137-1143.
8. Kim, S. K. and Yee, J. J., 2007, The Effects to Indoor Air Quality as Ventilation System Operation in Apartment House Using CFD Simulation, Korean Journal of the SAREK, Vol. 19, No. 2, pp. 142-148.
9. Choi, J. M. and Cho, S. W., 2009, A study on the Indoor Airflow Pattern by Changing the Location of Mechanical Terminal Unit., Korean Journal of the SAREK, Vol. 21, No. 3, pp. 193-200.
10. Meneveau, C., Lund, T. S. and Cabot, W. H., 1996, A Lagrangian Dynamic Subgrid-scale Model of Turbulence, J. Fluid Mech., Vol. 319, pp. 353-385.
11. Balaras, E., 2004, Modeling complex boundaries using an external force field on fixed Cartesian grids in large-eddy simulations, *Comp. and Fluids*, Vol. 33, pp. 375-404.
12. Kim, J. and Choi, H., 2004, An Immersed-Boundary Finite-Volume Method for Simulation of Heat Transfer in Complex geometrics, *KSME Int. J.*, Vol. 18, No. 6, pp. 1026-1035
13. How to reduce the Indoor Air Pollutant, 2009, Joongang-Ilbo
14. Lilly, D. K., 1992, A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method, *Phys. Fluids*, Vol. 4, pp. 633-635.
15. Nakagawa, S., Senda, M., Hiraide, A. and Kikkawa, S., 1999. Heat transfer characteristics in a channel flow with a rectangular cylinder, *JSME International Journal*, Vol. 42, pp. 188-196.
16. http://iaenv.kict.re.kr/sub3/data_01_3_2.asp.
17. http://epic.kdi.re.kr/epic_attach/2004/R0402058.pdf.
18. http://iaenv.kict.re.kr/sub3/data_03.asp.