

공기청정 시스템 성능예측을 위한 실내 유동현상에 관한 수치모사

손덕영* · 이두환* · 길재홍* · 최윤호** · 김동현***

*아주대학교 기계공학과 대학원, **아주대학교 기계 및 산업공학부, ***주펩콘

Numerical Simulation of Flows inside the Various Rooms for Performance Assessment of Air Cleaning System

Deok-Young Sohn*, Du-Hwan Lee*, Jae-Heung Gill*, Yun-Ho Choi**
and Dong-Hyun Kim***

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Ajou University

**Department of Mechanical and Industrial Engineering, Ajou University

***Pepcon Inc.

요 약

본 연구에서는 공기청정기의 최적설계에 필요한 자료를 획득하기 위해 다양한 실내공간에서의 유동에 대한 연구를 수치해석적인 방법으로 수행하였다. 실내유동 해석을 위해서 사용된 공기청정기의 사용처로는 물류창고, 아파트 거실과 주방, 6인 병실을 선정하여 계산을 수행하였다. 시간에 따른 평균농도 변화는 모든 실내공간에서 완전 혼합(perfect mixing)인 경우와 매우 흡사하게 나타나는 것을 볼 수 있었고, 공기청정기의 설치 위치가 시간에 따른 실내의 평균농도 변화에 미치는 영향은 미미한 것을 볼 수 있었다. 실내의 국부적인 농도를 살펴보면 사용처 별로 유동의 흐름이 원활하지 못해서 생기는 공기정화 취약구역을 관찰할 수 있었으며, 이는 각 공간모델과 공기청정기의 설치위치에 따라 크게 달라지는 것을 볼 수 있었다.

Abstract — In this paper, flowfields inside the various rooms have been investigated. A storage room, a livingroom with a kitchen in an apartment, and a hospital room are considered in the present calculations. In all cases, it was found that the average of air change rate is similar to that of perfect mixing assumption and the location of air purifier has little effects on the average air change rate. Detailed local air concentrations show that there are regions where air is not quite purified because of non-uniform circulation of air flow. The location of air purifier has great effects on this behavior.

1. 서 론

일반 주택 및 사무실을 비롯한 국내 건축물과 산업체의 위생적이고 쾌적한 문화공간의 창출과 에너지 절약을 위하여, 그리고 밀폐된 현대식 고층 빌딩이나 극도의 청정을 요구하는 클린룸 또는 생산 공정 중 유해한 물질을 다량 발생시키는 작업장의 필요에 따라 공기 오염물질 처리에 관련한 기술의 중요성이 크게 부각되고 있다. 이와 같은 요구에 부응하여 최근 다양한 공기청정기가 개발되고 있으며, 이러한 공기청정기에 의해 형성되는 실내의 공기분포는 기기의 사용처, 위치, 제품형태 등에 따라 그 유동형태가 크게 달라지게 된다. 따라서 오염환경 출입

에 따라 발생된 오염물질의 신속한 정화와 공기청정기 기성능 개선을 위하여는 실내의 공기유동에 대한 정량적 예측이 필요하다. 실내의 공기분포를 예측하기 위한 기법으로는 기류의 가시화, 풍속분포의 직접 측정, 수치해석 등의 방법이 있다¹⁾. 기류의 가시화 방법은 유동장 전체의 유동 양상을 파악하는데 적합하지만 정량적인 자료를 얻기에는 부적합하다. 풍속분포의 직접 측정방법에는 탄뎀형 열선 풍속계, 스모크와 서미스터 풍속계의 병용, 또는 초음파 풍속계 등이 이용되고 있다. 이러한 방법으로는 비교적 정확한 정량적인 자료를 얻을 수 있지만 많은 위치에서 측정해야 하므로 시간과 경비가 많이 들게 된다. 수치해석 방법은 유체역학 이론에 근거하여 해석

모델을 설정하며, 유동장의 변수를 자유롭게 설정할 수 있다는 점, 재현성이 뛰어나며 실험에서 구할 수 없는 시간과 공간상의 상세한 자료를 얻을 수 있다는 점에서 위에 언급한 실험방법을 대체하는 수단으로 최근 크게 주목받고 있다. 그러므로 본 연구에서는 모델을 통한 실험 결과를 실제 실내공간에 확장시키는 어려움을 극복하고 실내 오염물질의 거시적인 움직임을 예측함은 물론 오염 물질의 효과적인 제어를 위하여 수치해석 방법을 적용한다.

일반 또는 산업용 건축물 내부 그리고 공기 청정기 내부 유동장의 수치해석은 각 공간에 배치된 다양한 집기, 가구, 하적물, 전자 기기 등으로 인한 복잡한 기하학적 형상을 가지게 되어 매우 어렵다. 본 연구에서는 미국 FLUENT사에서 개발한 FLUENT 코드^[2]를 이용하여 유동장을 해석한다. 본 코드는 지배 방정식으로 3차원의 비압축성 유동의 연속 방정식과 모멘텀 방정식을 고려하며, 층류와 난류 모두에 적용할 수 있다. 또한 비정렬 격자계를 사용하여 본 연구와 같은 형상이 복잡한 유동 해석에 적합하다. 본 연구에서는 본 코드를 이용하여 공기 청정기의 각종 사용처 및 다양한 크기의 실내공간에 대한 해석을 수행하며, 이를 통하여 공기 청정기 용량 평가, 적정 위치 선정, 성능개선 및 최적 운전 조건 등 최적설계에 이용될 자료를 획득하고자 한다.

2. 지배방정식과 수치해석 기법

본 연구에서는 위에 언급한 유동현상에 대한 3차원 수치해석을 수행하기 위하여 범용 상용코드인 FLUENT 코드를 사용한다. 본 코드는 지배 방정식으로 비압축성 유동의 연속 방정식과 모멘텀 방정식을 고려하며, 기본 좌표계로서는 비직교 격자계를 사용할 수 있도록 일반 곡선좌표계를 사용한다. 본 연구에서는 난류 유동장을 해석하기 위하여 난류 모델로서 표준 k-ε 난류 모델을 고려한다(여기서 k는 난류운동에너지이며, ε은 난동 소산율이다.). 본 연구에서 사용하는 비압축성 난류유동에 대한 비정상 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2u_k}{3} \delta_{ij} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right\} \tag{2}$$

여기서 식 (1)과 식 (2)는 각각 연속방정식과 모멘텀방정식이며, 속도 u_i 는 시간평균값이고 난류효과는 Reynolds stress($\overline{\rho u'_i u'_j}$)를 통하여 나타나게 된다.

난류유동에서의 Reynolds stress는 평균속도 구배에 비례하며, 그 비례상수는 난류 점성계수 μ_t 이다. 이와 같은 가정은 Boussinesq 가설로 알려져 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = -\rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \tag{3}$$

본 연구에서 난류점성계수를 구하기 위하여 사용한 모델은 표준 k-ε 모델로서, k(난류 운동에너지 : turbulence kinetic energy)와 ε(난동소산율 : dissipation rate)에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{u_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{u_i}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{6}$$

여기서 계수 $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ , σ_k , σ_ϵ 는 경험상수이며 G_k 는 난류 운동에너지의 생성항이다.

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \tag{7}$$

비정상 상태의 농도 분포를 해석을 위해서는 오염물질의 질량 보존 법칙을 이용하여 다음과 같은 비정상 상태의 농도 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial c}{\partial z} \right) \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 c 는 오염공기의 농도이다.

본 코드는 Patankar^[3]의 제어체적 방법을 기본으로 하여 이산화(discretization)하였으며, 격자는 모든 종속변수가 동일하게 검사체적의 중앙에 위치하도록 비엇갈린 구조(non-staggered grid)로 되어 있다. 또한 복잡한 형상에 대하여도 해석할 수 있도록 비직교 격자로 형성된 일반 곡선좌표계를 사용한다. 대류항에 대한 차분기법으로는 power law 기법을 사용하며, 모멘텀 방정식에 나타난 속도와 압력의 관계는 압력을 추정하여 속도를 보정하는 방법인 SIMPLER 알고리즘을 사용한다. 또한 해의 수렴조절 및 안정성을 위하여 하향이완법을 적용한다. 본 연구에서의 비정상계산은 재재적 시간 적분을 이용하였으며, 이는 각 물리적 시간에 대한 수렴해를 적

절한 횟수(약 400번)의 내부 반복을 통하여 구하고, 이와 같은 과정을 시간의 경과에 따라 반복하여 수행하였다.

3. 경계조건

본 연구에서는 초기 농도를 0으로 균일하게 하고 정화공기의 농도는 1.0으로 무차원하였다. 실내에는 오염원이 존재하지 않으며 벽면은 완벽하게 밀봉되어 공기 투과가 없다고 가정하였다. 경계조건은 급기면과 흡기면, 벽면에 적용하였으며 다음과 같다. 급기면에서는 급기면에 수직인 속도성분만이 존재하는 것으로 간주하여 일정속도를 부과하였고, 흡기면에서는 대기압의 출구압력 조건을 부과하였다. 모든 벽면에서는 점착조건을 주었으며, 농도의 구배가 영이 되도록 처리하였다. 이상의 경계조건을 다음과 같은 수식으로 요약할 수 있다.

- 급기면 : 일정속도($u_1=u_m, u_2=u_3=0$), 일정농도($c=c_m$)
- 흡기면 : 일정압력($p=p_{atm}=1 \text{ atm}$), 일정농도구배($\frac{\partial c}{\partial n}=0$)
- 벽 면 : 점착조건($u_1=u_2=u_3=0$), 일정농도구배($\frac{\partial c}{\partial n}=0$)

4. 실내 오염공기 농도의 변화

실제의 공기정화 과정에 있어서는 오염공기와 정화공기 간의 혼합이 이루어지면서 실내공기의 농도 변화가 일어나게 되고, 이러한 농도변화는 위치에 따라 다르며, 농도 변화율도 일정하지 않다. 그러므로, 본 연구에서 시간에 따른 농도변화는 전체공간의 평균농도를 다음과 같은 식에 의하여 구하였다.

$$\frac{1}{V} \int c dV = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n c_i V_i \quad (9)$$

V와 V_i 는 각각 실내체적과 각 cell의 체적이며, c와 c_i 는 각각 구하고자 하는 평균농도와 각 cell의 농도이다. 그러나, 이러한 실제의 현상과 별도로 공기정화 과정에서의 시간에 따른 농도변화를 이상적으로 고려한 모델이 있으며, 이는 다음과 같은 완전 대체(perfect displacement)와 완전 혼합(perfect mixing) 모델이다.

4-1. 완전 대체(Perfect Displacement)

완전 대체 과정은 그 어떤 혼합없이 오염공기가 정화공기로 완전교환되며, 초기오염공기가 100% 정화공기로 대체될때까지는 초기의 오염공기만이 공기청정기 흡입구로 흡입된다고 가정하는 것이다¹⁴⁾. 이 모델에 의하면 오염공기가 100% 정화되는데 걸리는 시간은 V/Q 가 되는데 여기서 V는 실내체적이며, Q는 공급되는 정화공

기의 유량이다. 100% 정화가 이루어지기까지의 오염공기 농도 $c(t)$ 를 식으로 표현하면 다음과 같으며, 정화공기의 농도는 $1-c(t)$ 가 된다.

$$c(t) = 1 - \frac{Q}{V}t \quad (t=0 \sim V/Q) \quad (10)$$

4-2. 완전 혼합(Perfect Mixing)

실내 공기의 혼합이 완전하게 이루어질 경우, 실내 오염물질의 농도는 어느 위치에서나 일정하며 이는 배기구에서 농도와도 같다. 이 경우 오염물질의 질량 보존을 적용하여 다음과 같이 단순한 일차 상미분 방정식을 유도할 수 있다.

$$\rho V \frac{dc}{dt} = -\rho Qc \quad (11)$$

여기서 ρ 는 공기의 밀도이고, 정화공기의 농도가 0이라고 가정하면 실내의 오염공기 농도는 시간에 다음과 같이 지수적으로 감소된다¹⁵⁾.

$$c(t) = c_0 e^{-QcVt} \quad (12)$$

5. 결과 및 검토

5-1. 물류참고

그림 1은 본 연구에 사용된 공간모델 중 하나인 물

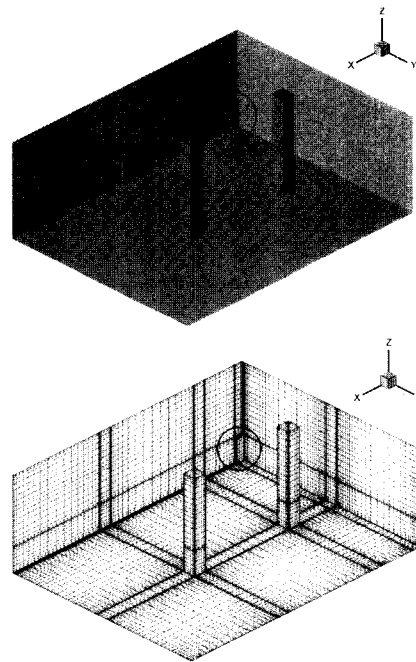


그림 1. 물류참고의 3차원 모형도 및 계산격자.

류창고의 3차원 모형도와 내부 유동해석을 위해 사용된 계산격자(case 1)를 보여주고 있다. 이 물류창고는 높이 3.14 m, x-방향 8.96 m, y-방향 6.98 m의 길이로 약 19 평의 바닥면적을 가지고 있으며, 물류창고 내부에는 44 cm × 44 cm인 기둥이 2개 있다. 공기청정기의 위치는 물류창고의 구석인 경우(case 1)와, x-방향 벽면의 중앙인 경우(case 2)를 고려하였다. 계산에 사용된 공기청정기는 10~20평의 면적에 적합한 모델로서, 정화공기 배출유량은 11 m³/min, 출구공기 속도는 6.32 m/s이다. 공기청정기가 구석에 위치한 경우에는 171,324 cells, x-방향 벽면 중앙에 위치한 경우에는 117,736 cells의 격자가 사용되었으며, 각각 4시간과 22시간의 cpu time이 본 계산에 소요되었다.

그림 2는 비정상 유동해석기법을 이용하여 공기청정기 가동후, 30분이 경과했을때의 정화공기 입자궤적을 보여주고 있으며, 2가지 경우 모두에서 기둥 주위의 와류와 공기청정기 인접벽면의 재순환 영역 등 매우 복잡한 3차원 유동특성을 관찰할 수 있다.

그림 3은 공기청정기 가동 후 10분이 지났을 때의 3차원 농도 분포를 보여주고 있다. 본 농도분포도에서 짙게 표시된 공간은 오염공기 농도가 50% 이하로(농도 $c \leq 0.5$) 감소된 부분을 나타내고 있다. 공기청정기의 위치가 구석인 경우, 공기청정기의 인접한 2개의 벽면 중 y-방향 벽면에서, 보다 빠른 순환이 이루어지고 있

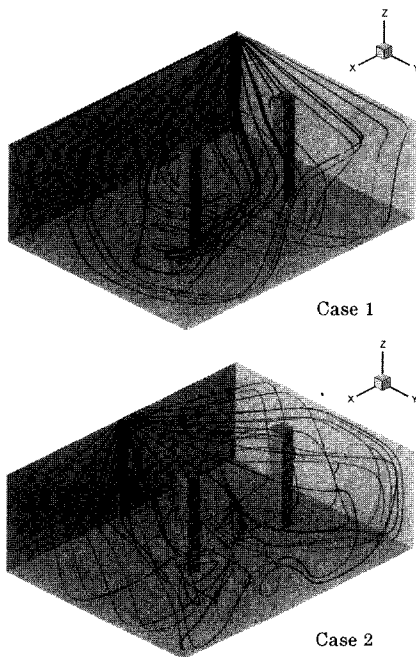


그림 2. 물류창고내 유동의 입자궤적.

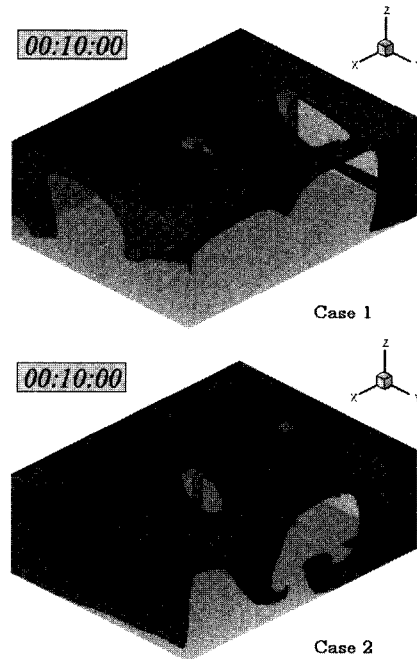


그림 3. 물류창고 내부의 3차원 농도분포.

는데, 이는 공기청정기의 흡기구가 y-방향을 향해 있는 이유와 함께 y-방향의 벽면이 x-방향에 비해 작은 면적을 가지고 있어 순환 속도가 빠르기 때문에 발생하는 현상이다. 또한, 공기청정기와 가까운 거리에 있는 기둥을 지나는 유속이 보다 크므로, 그 기둥의 후류에 큰 재순환 영역이 형성되는 것을 볼 수 있다. 공기청정기 위치가 x-방향 벽면 중앙인 경우에는 공기청정기를 중심으로 2개의 기둥이 비대칭적으로 위치하고 있으므로, 보다 유동이 원활한 방향부터 오염공기 농도가 감소되고 있으며, 공기청정기와 보다 가까운 거리에 있는 기둥 주위로 큰 재순환 영역이 생기는 것을 볼 수 있다.

그림 4는 공기청정기가 가동되어 30분이 경과한 후에 오염공기의 농도가 다른 구역에 비해 높은 지역, 즉 정화속도가 상대적으로 느린 구역을 나타낸 그림으로서, 오염공기농도 20% 이상인($c \geq 0.2$) 공기정화 취약 구역과 그 구역을 지나는 임의의 단면에 대한 2차원 유선궤적을 나타내고 있다. case 1의 경우에는 y-방향 벽면의 강한 재순환 영역에서, case 2의 경우에는 공기청정기의 좌우 벽면에 생기는 재순환 영역에서 취약구역이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

그림 5(a)는 시간에 따른 물류창고 내부의 평균농도 변화를 급기구 속도별로 나타낸 그림이다. 급기구 속도가 2 m/s, 4 m/s, 6.32 m/s로 증가함에 따라, 30분 후 실

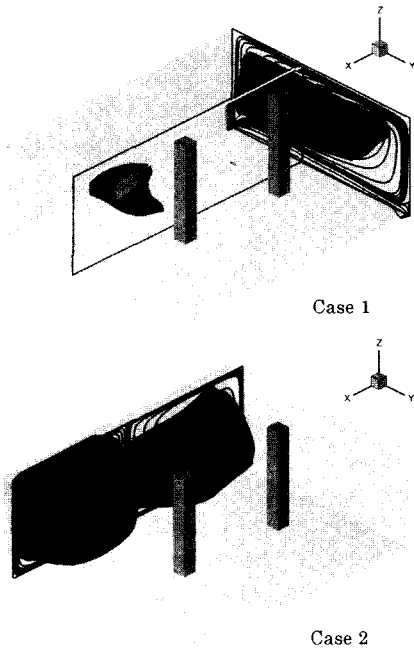
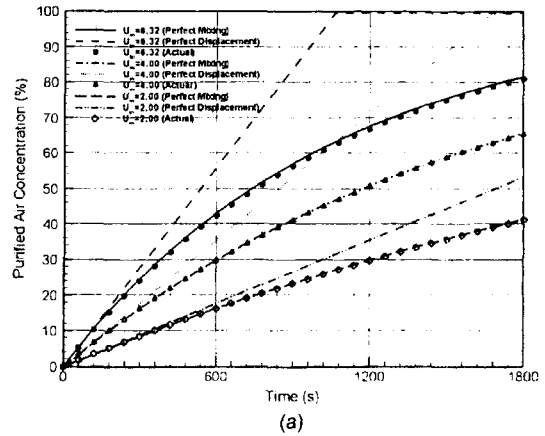


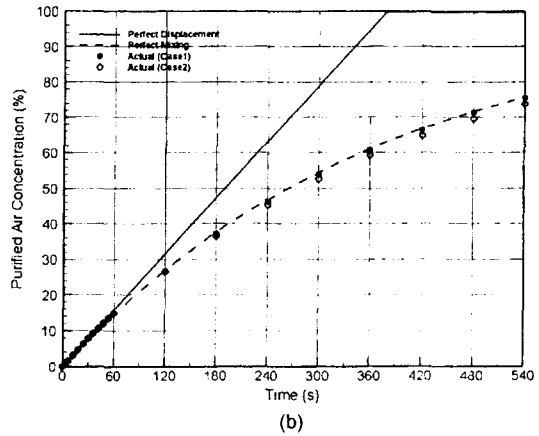
그림 4. 물류창고 내부의 공기정화 취약구역.

내 정화공기 농도는 약 41%, 65%, 81%로 증가하지만, 그 증가폭은 점점 작아지고 있으며, 위 각각의 경우에 대하여 완전 대체 모델과 완전 혼합 모델의 계산결과와 비교하였다. 완전 대체 모델의 경우 실내공기가 100% 정화되기까지는 급기구 속도 6.32 m/s인 경우, 17분 30초가 소요되는데, 이 때의 실제 평균농도는 63%로 완전 혼합인 경우와 유사한 거동을 보이고 있으며, 완전 대체 모델과는 37%의 큰 차이를 보인다. 이와 같이 실제 평균농도와 완전 대체 모델의 평균농도의 값이 큰 차이를 보이는 것은 완전 대체 모델이 실제공기에서 일어나는 혼합현상을 무시한 모델이기 때문이다. 그림 5(b)는 급기구 속도 6.32 m/s에서의 시간에 따른 물류창고 내부의 평균농도 변화를 공기청정기 위치에 따라 나타난 그림으로서, 공기청정기를 30분 동안 가동했을 경우, 오염공기가 80% 이상 감소된다. 공기청정기 위치에 따른 실내 평균농도의 차이는 약 1%로 미미하며, 따라서 공기청정기 위치가 실내의 전체 평균농도에 미치는 영향은 작다는 것을 알 수 있다.

본 계산에서 실내의 비정상유동장의 해는 1분 간격으로 총 30개의 데이터를 취합하였지만, 그림 2~4에 표시한 10분, 30분과 같은 시각은 각각의 경우의 유동특성을 비교적 잘 나타내는 시간으로 선정하였다. 차후의 계산대상에 나타나는 그림에서도 유사하게 시간을 설정하였다.



(a)



(b)

그림 5. 물류창고 내부의 농도변화.

5-2. 아파트거실

그림 6은 아파트 거실의 3차원 모형도와 내부 유동해석을 위해 사용된 계산격자(case 1)를 보여주고 있다. 본 공간모델은 높이 3 m, x-방향 4.8 m, y-방향 5 m로 약 7평의 면적을 가지고 있으며, 거실 내부에는 A/V 장식장과 쇼파가 있다. 공기청정기의 위치는 거실의 구석인 경우(case 1)와, 거실 중앙인 경우(case 2)를 고려하였다. 계산에 사용된 공기청정기는 10~20평의 면적에 적합한 모델로서, 정화공기 배출유량은 11 m³/min, 속도는 6.32 m/s이다. 공기청정기가 구석에 위치한 경우에는 254,318 cells, x-방향 벽면 중앙에 위치한 경우에는 140,013 cells의 격자가 사용되었으며, 각각 40시간과 24시간의 cpu time이 본 계산에 소요되었다.

그림 7은 공기청정기 가동 후, 9분이 경과했을 때의 정화공기 입자궤적을 보여주고 있으며, 그림 8은 공기청정기 가동 후 4분이 지났을 때의 3차원 농도 분포를 보여주고 있다. 공기청정기의 위치가 구석인 경우, 공기청정기의 반대편에서부터, 쇼파와 A/V 장식장 사이에 형

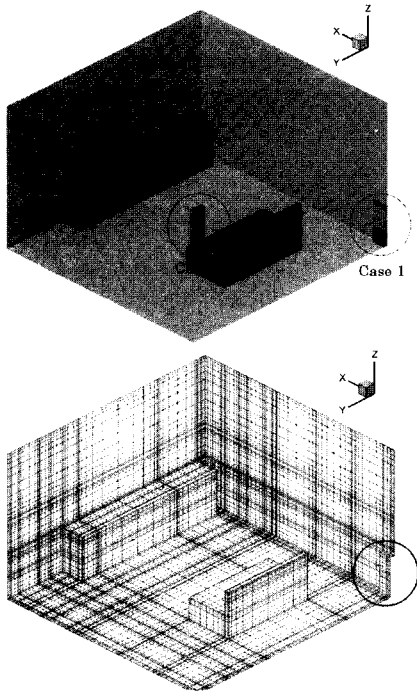


그림 6. 아파트 거실의 3차원 모형도 및 계산격자.

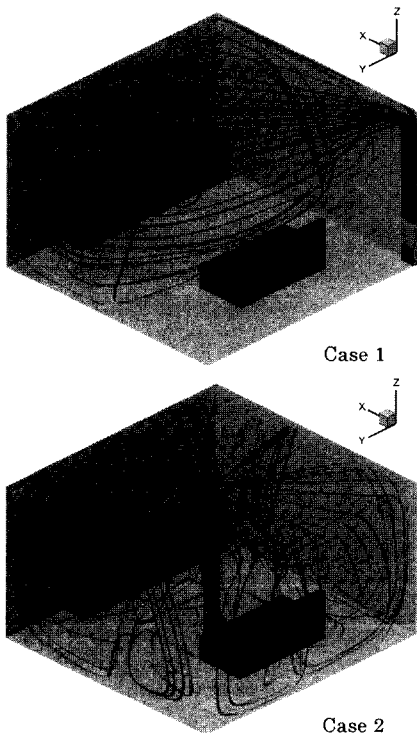


그림 7. 아파트 거실내 유동의 입자궤적.

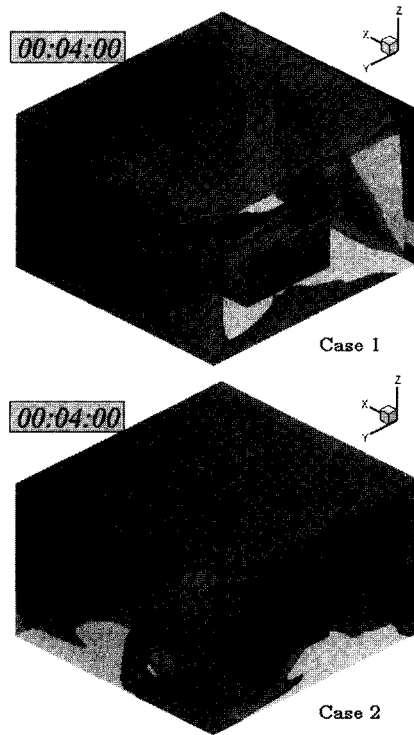


그림 8. 아파트 거실 내부의 3차원 농도분포.

성된 유로를 따라서 공기의 교환이 이루어지고 있으며, 공기청정기 위치가 중앙인 경우에는 공기청정기를 중심으로 사방 벽면부터 점차적으로 공기의 교환이 이루어지는 것을 볼 수 있다.

그림 9는 공기청정기가 가동되어 9분이 경과한 후에 오염공기농도 0.28 이상인 공기정화 취약 구역과 그 구역을 지나는 입자의 단면에 대한 2차원 유선궤적을 나타내고 있다. case 1의 경우에는 공기청정기의 흡입구가 향하고 있는 y-방향 벽면과 쇼파 후면 사이의 강한 재순환 영역에서, case 2의 경우에는 공기청정기의 뒷면, 즉 쇼파의 상부와 A/V 장식장의 상단 등에서 취약구역이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

그림 10은 시간에 따른 거실 내부의 평균농도 변화를 공기청정기 위치에 따라 나타낸 그래프로서, 공기청정기를 9분 동안 가동했을 경우, 오염공기가 74% 이상 감소되며, 공기청정기의 위치가 구석인 경우가 중앙인 경우보다 정화가 잘 이루어지는 것으로 보여지나, 그 차이는 매우 작다.

5-3. 아파트 거실과 주방

그림 11은 아파트 거실과 주방의 3차원 모형도 및 내부 유동해석을 위해 사용된 계산격자를 보여주고 있다.

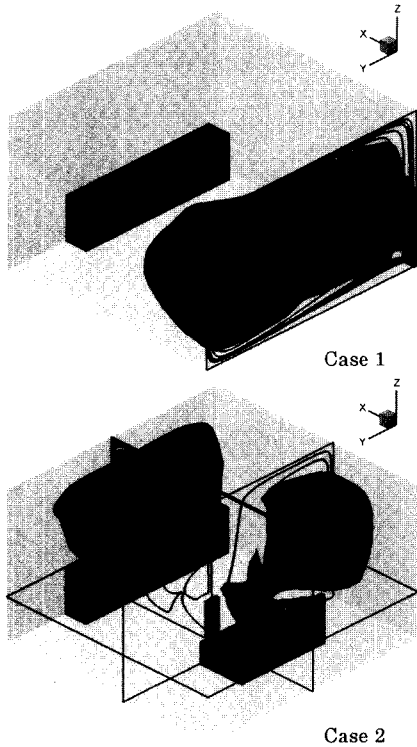


그림 9. 아파트 거실 내부의 공기정화 취약구역.

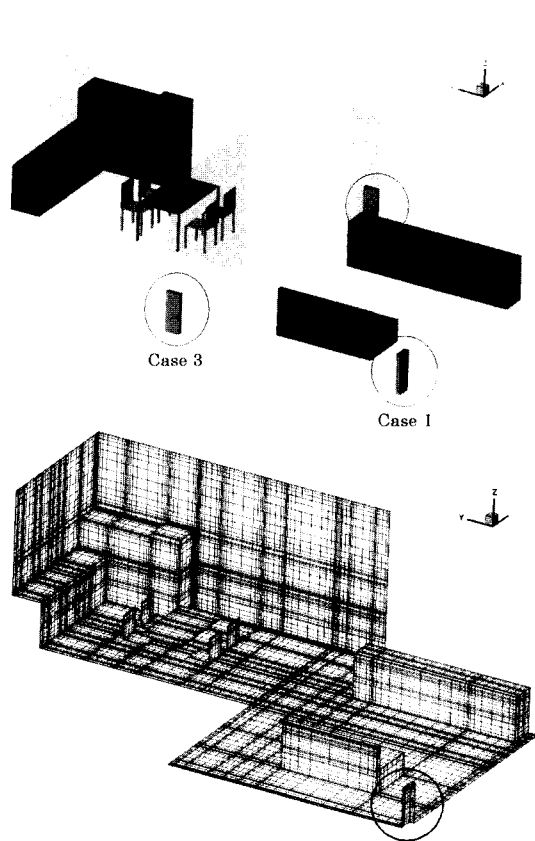


그림 11. 아파트 거실과 주방의 3차원 모형도 및 계산격자.

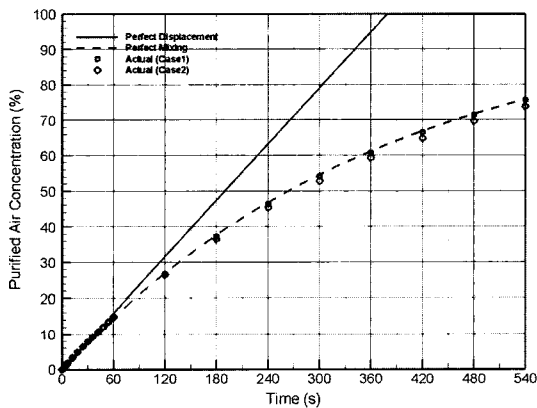


그림 10. 아파트 거실 내부의 농도 변화.

본 공간모델은 높이가 3 m이고, 약 11평의 면적을 가지고 있으며, 내부구조물로는 거실의 A/V 장식장과 쇼파, 부엌의 싱크대와 냉장고, 식기수납장, 식탁과 의자 4개가 설치되었다. 공기청정기의 위치는 아파트 공간상의 구석부분 중 3곳(case 1, case 2, case 3)을 임의로 선정하였다 계산에 사용된 공기청정기는 10~20평의 면적에 적합한 모델로서, 정화공기 배출유량은 11 m³/min, 속도

는 6.32 m/s이다. 공기청정기의 위치가 case 1인 경우에는 486,242 cells, case 2인 경우에는 486,394 cells, case 3인 경우에는 486,242 cells의 격자가 사용되었으며, 약 100시간의 cpu time이 각각의 case에 대한 계산에 소요되었다.

그림 12는 공기청정기 가동 후, 15분이 경과했을 때의 청정공기 입자계적을 보여주고 있으며, 그림 13은 공기청정기 가동 후 3분이 지났을 때의 3차원 농도 분포를 보여주고 있다. case 1의 경우, 공기청정기로부터 배출되는 정화공기의 진행방향이 주방입구를 향하고 있어서 거실과 주방 모두에서 정화가 시작되고 있으나, case 2의 경우에는 주방 먼저, case 3의 경우에는 거실 먼저 정화가 일어난 후에 각각 거실, 주방의 정화가 시작되는 것을 볼 수 있다.

그림 14는 공기청정기가 가동되어 15분이 경과한 후에 오염공기농도 0.35 이상인 공기정화 취약 구역을 나타내고 있다. case 1의 경우에는 전 공간에 걸쳐 균일하게 정화가 일어나서 취약구역이 거의 존재하지 않음

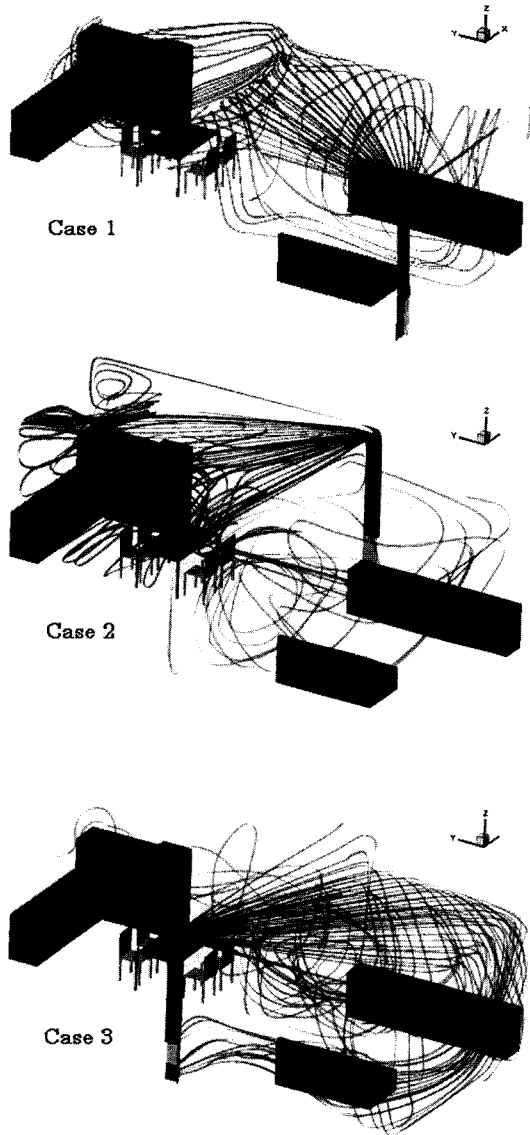


그림 12. 아파트 거실과 주방내 유동의 입자궤적.

나, case 2와 case 3는 각각 거실과 주방이 뒤늦게 정화가 시작되었기 때문에, 극부적으로 불균일한 농도분포를 나타내게 된다.

그림 15는 시간에 따른 아파트 거실과 주방 내부의 평균농도 변화를 공기청정기 위치에 따라 나타낸 그래프로서, 공기청정기를 15분 동안 가동했을 경우, 오염공기가 70~75% 이상 감소된다. 공기청정기의 위치가 case 3인 경우에는 case 1, case 2에 비해 오염공기 감소량이

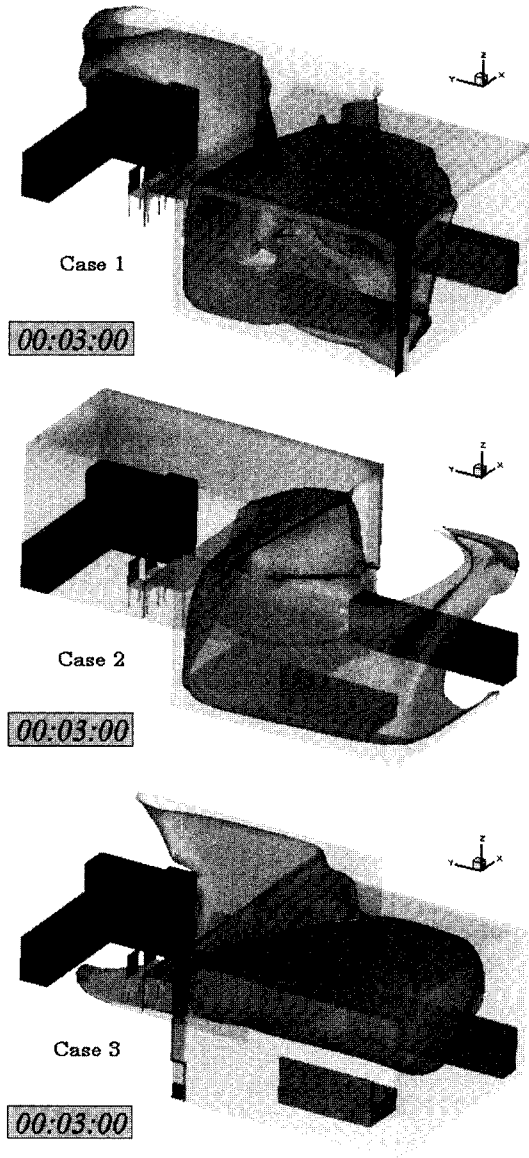


그림 13. 아파트 거실과 주방 내부의 3차원 농도분포.

5% 차이를 보이는데 이는 그림 14에서 보이는 광범위한 취약구역을 통해서도 확인할 수 있다. 또한, 아파트 거실과 주방 모델은 복잡한 공간구조와 많은 내부구조물로 인해 다른 모델들과 달리 완전혼합인 경우의 공기정화 능력과 약간의 차이를 보이게 된다.

5-4. 6인 병실

그림 16은 6인 병실의 3차원 모형도와 내부 유동해석을 위해 사용된 261,020 cells의 계산격자를 보여주고

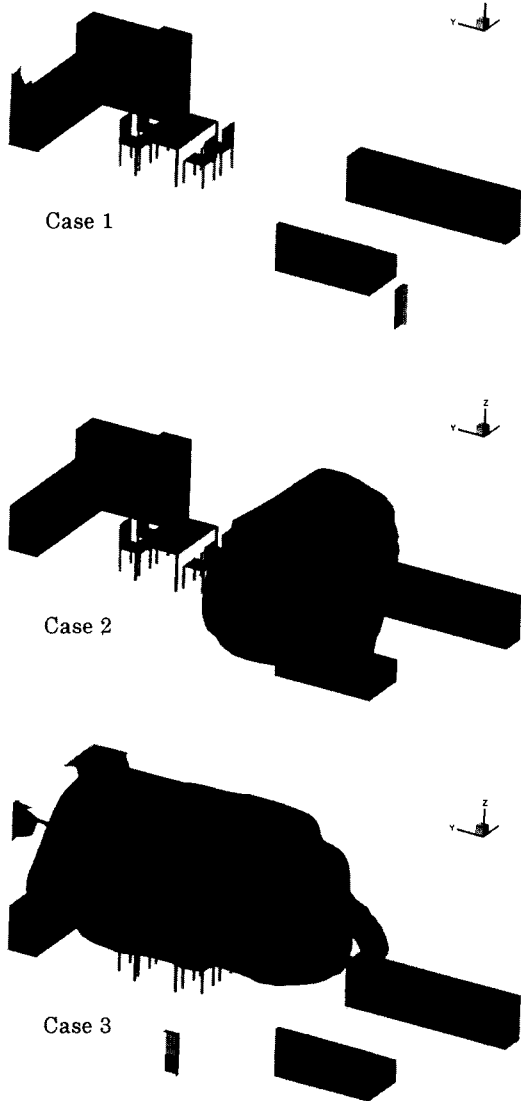


그림 14. 아파트 거실과 주방 내부의 공기정화 취약구역.

있다. 본 공간모델은 높이가 2.7 m이고, x-방향 6.4 m, y-방향 6.1 m로 약 12평의 면적을 가지고 있으며, 내부구조물로는 병상, 수납공간, 조명 및 편의시설 각 6개와 함께 TV 수납장, 냉장고가 설정되었다. 계산에 사용된 공기청정기는 10~20평의 면적에 적합한 모델로서, 정화공기 배출유량은 11 m³/min, 속도는 6.32 m/s이다. 병실의 구조가 공기청정기를 중심으로 대칭인 형태이므로, 실선으로 표시된 격자공간만을 계산영역으로 설정하였으며, 약

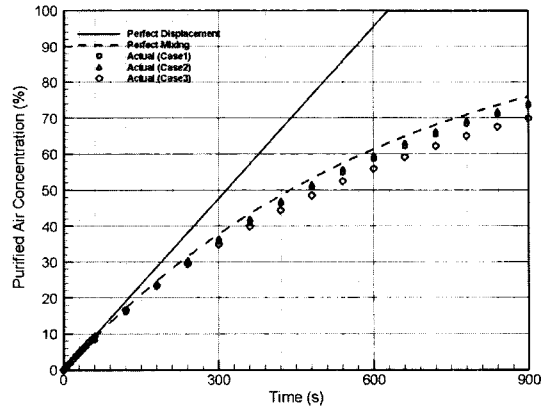


그림 15. 아파트 거실과 주방 내부의 농도 변화.

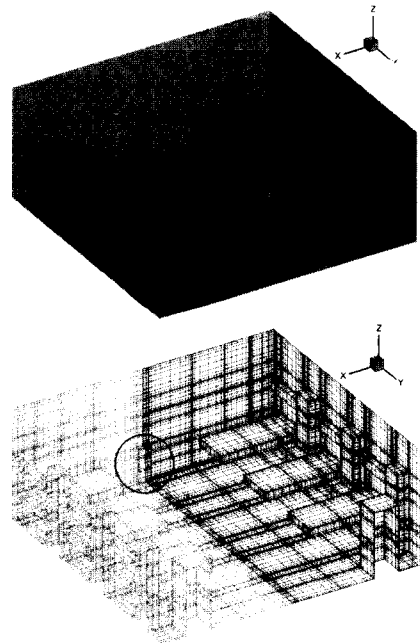


그림 16. 6인 병실의 3차원 모형도 및 계산격자.

60시간의 cpu time이 본 계산에 소요되었다.

그림 17은 각각 공기청정기로부터 나온 정화공기의 입자적과 공기청정기 가동 후 6분이 지났을 때의 3차원 농도 분포를 보여주고 있다. 공기청정기로부터 나온 정화공기는 천정을 타고 진행하다가 다시 벽면으로 내려오면서 침상의 머리부분을 거쳐 침상사이 대칭면에 생긴 유로를 통해 흡입구로 들어오게 된다. 이로 인해 중앙 대칭면에 재순환 영역을 형성하게 되고, 공기정화는 대칭면 바닥과 병실 벽면을 따라 침상 머리부분부터 서

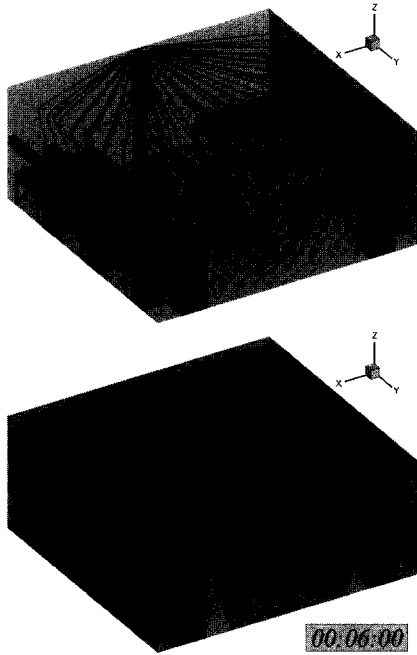


그림 17. 병실내 유동의 입자계적 및 3차원 농도분포.

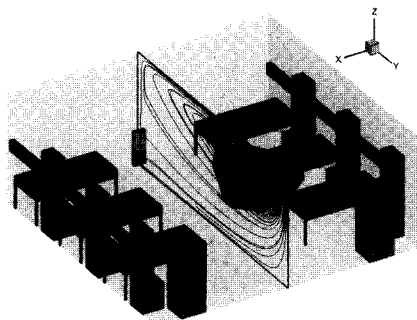


그림 18. 병실 내부의 공기정화 취약구역.

서히 정화되어 간다.

그림 18은 공기청정기가 가동되어 15분이 경과한 후에 오염공기 농도 0.25 이상인 공기정화 취약 구역과 그 구역을 지나는 임의의 단면에 대한 2차원 유선계적을 나타내고 있다. 대칭면을 따라 생기는 재순환 영역으로 인해 취약구역이 대칭면의 공간상에 존재하긴 하나, 그 크기가 작아서 전체적으로 비교적 균일한 정화가 이루어진다고 볼 수 있다.

그림 19는 시간에 따른 병실 내부의 평균농도 변화를 나타낸 그래프로서, 공기청정기를 15분 동안 가동했을 경우, 오염공기가 약 80% 감소된다.

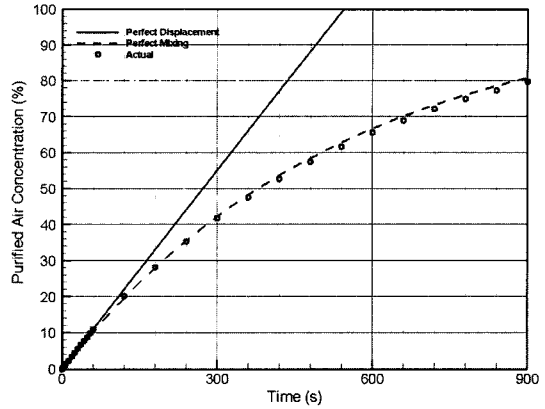


그림 19. 병실 내부의 농도변화.

6. 결 론

본 연구에서는 공기청정기의 최적설계에 필요한 자료를 획득하기 위해 다양한 실내공간에서의 유동에 대한 연구를 수치해석적인 방법으로 수행하였다. 실내유동 해석을 위해서 사용된 공기청정기의 사용처로는 물류창고, 아파트 거실과 주방, 6인 병실을 선정하여 계산을 수행하였다. 시간에 따른 평균농도 변화는 모든 실내공간에서 완전 혼합인 경우와 매우 흡사하게 나타나고 있으므로, 이를 완전 혼합으로 가정할 수 있다. 즉, 임의의 실내공간에 공기청정기를 설치했을 때의 시간에 따른 평균농도 변화를 구하고자 할 때는 완전 혼합에 관한 식 (11)을 이용하여 간단하게 계산하는 것이 보다 효율적인 것이다. 또한, 공기청정기의 설치 위치가 시간에 따른 실내의 평균농도 변화에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 실내의 국부적인 농도를 살펴보면 유동의 흐름이 원활하지 못해서 생기는 공기정화 취약구역을 관찰할 수 있는데, 이는 각 공간모델과 공기청정기의 설치위치에 따라 크게 달라진다. 공기정화 목적상 중요시되는 실내의 국부적인 공간에 공기정화 취약구역이 생기지 않게 하고, 그 부분에서 보다 빠르게 오염 농도를 감소시키기 위해서는 급기구의 급기각도에 대한 연구가 추후 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 환경부의 차세대 핵심환경기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 심우섭 외: "장방형 공간내 난류유동 및 오염물질 거

- 등의 수치해석”, 공기조화·냉동공학 논문집, Vol. 3, No. 5, pp. 350-364 (1991).
2. FLUENT user's guide (Version 5.0), Fluent Incorporated, January 2000.
3. Patankar, S.V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, D.C. (1980).
4. John B. Heywood: Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book Co. (1988).
5. 한화택: “난류유동해석을 통한 환기효율의 수치해석적 연구”, 공기조화·냉동공학 논문집, Vol. 4, No. 4, pp. 253-262 (1992).