

난류유동해석을 통한 환기효율의 수치해석적 연구

Numerical Analysis of Ventilation Effectiveness using Turbulent Airflow Modeling

한 화 택*
H. T. Han

Key Words : 환기효율(Ventilation Effectiveness), 실내공기유동(Room Airflow), 난류모델 (Turbulence Model)

ABSTRACT

A numerical procedure is introduced to calculate local ventilation effectiveness using the definitions of local decay rate and local mean age. A low Reynolds number k-ε model is implemented to calculate steady state turbulent velocity distributions, and a step-down method is used to calculate transient concentration distributions. Simulations are carried out for several different values of air change rates and several different diffuser angles in a two-dimensional model of a half scale office room. The results show that the local ventilation effectiveness within a room could vary significantly from one location to another. The nominal air change rate based on the assumption of complete mixing of room air does not provide the local ventilation effectiveness information. It is numerically proved that the local mean age distribution obtained from the transient calculation is equivalent to the steady state concentration distribution with homogeneously distributed contaminant sources.

기호설명

<p><i>ACH</i> : 시간당 공기교환율 [1/hr]</p> <p><i>c</i> : 오염농도 [kg/kg]</p> <p><i>c₀</i> : 초기농도 [kg/kg]</p> <p><i>c_∞</i> : 정상상태의 농도 [kg/kg]</p> <p><i>D</i> : 오염물질의 분자확산계수 [m²/s]</p> <p><i>D_{tot}</i> : 전체 확산계수 [m²/s]</p>	<p><i>k</i> : 난류운동에너지 [m²/s²]</p> <p><i>m</i> : 오염원의 강도 [kg/kg/s]</p> <p><i>Q</i> : 공급 체적 유량 [m³/s]</p> <p><i>R_T</i> : 난류 Reynolds수</p> <p><i>Sc_T</i> : 난류 Schmidt수</p> <p><i>t</i> : 시간 [s]</p> <p><i>u</i> : 속도벡터 [m/s]</p> <p><i>u</i> : 수평 속도성분 [m/s]</p>
--	--

* 국민대학교 기계설계학과

v	: 수직 속도성분 [m/s]
V	: 실내 체적 [m ³]
x	: 수평좌표 [m]
y	: 수직좌표 [m]
ϵ	: 난류 에너지소산율 [m ² /s ³]
ϕ	: 연령빈도 분포함수
Φ	: 누적 연령분포함수
λ	: 농도감소율 [1/s]
μ_0	: 평균연령 [s]
ν	: 동점성계수 [m ² /s]
ν_T	: 난류 동점성계수 [m ² /s]
ρ	: 공기밀도 [kg/s ³]
σ_c	: 난류소산율 확산계수 [m ² /s]
σ_k	: 난류운동에너지 확산계수 [m ² /s]
τ	: 연령 [s]

1. 서 론

실내에서 일하는 사람에게 필요한 신선한 공기를 공급하고 실내에서 발생하는 여러가지 오염 물질들을 제거하기 위해 흔히 기계 송풍에 의한 환기법을 이용하고 있다. 특히 에너지 절약을 위한 밀폐된 현대식 고층 빌딩이나 극도의 청정을 요구하는 클린룸 또는 생산 공정 중 유해한 오염 물질을 다량 발생시키는 작업장 내에서의 환기는 더욱 효과적으로 제어되어야 한다. 환기설비의 설계를 위하여 경험에 의한 여러 방법과 지침⁽¹⁾들이 개발되어져 왔다. 이러한 방법들은 대부분 실내 공기의 완전 혼합이 이루어진다는 가정하에서 실내체류 인원 일인당 또는 실내 바닥의 단위 면적당 필요한 급기량과 공기 교환율을 제시한다. 이러한 가정하에서 설계된 환기 설비는 종종 필요 이상의 환기로 인하여 송풍 전력을 과다로 사용하게 되거나 불충분한 환기로 인하여 국부적으로 오염 물질의 농도가 기준치를 초과하는 경우를 초래할 수 있다. 따라서 최소의 송풍 전력을 이용하여 필요한 신선한 외기를 적절히 보급하고 실내 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있도록 하기 위하여 환기의 효율성을 고려하여야 한다.

환기 효율에 관하여 여러 실험 연구와 이론

연구가 행하여져 왔다. Sandberg^{2,3)}는 오염 물질의 평균 연령과 실내 체류 시간 등에 관한 개념을 제안하였고 실험 결과를 제시하였다. Skaret⁽⁴⁾등은 이 구역(two-zone) 모델을 제안하여 환기효율을 설명하였고 이를 실험적으로 증명하였다. 문헌 조사 결과 환기 효율에 관한 연구는 대부분 실험 연구임이 밝혀졌다. 환기 효율은 오염원의 위치, 급기 송풍량, 급기 및 배기구 위치, 그리고 실내 구조 등 여러 변수에 의해 결정된다. 이러한 변수들에 따라 실내 공기 유동의 형태가 변화하고 그에 따라 여러가지로 정의되어질 수 있는 환기 효율도 결정된다. 최근들어 전산 유체 역학의 발전에 힘입어 유체 유동의 해석을 위한 여러 가지 수치 해석적 방법과 난류 모델들이 개발되었고^{5,6)}, 공기 조화 연구에 응용되어 실내 공기의 유동 형태를 수치적으로 예측하기 위한 연구^{7,8)}가 시도되어져 왔다. 그러나 이와 같은 연구는 대부분 실내에서의 공기 유동 속도 분포에 관한 해석에 관심이 맞추어져 있으며, 계산된 공기 유동 특성을 이용하여 환기 효율을 수치적으로 예측하는 데에는 미치지 못하고 있다.

본 연구에서는 실내 공간에서 계산된 난류 유동 형태를 이용하여 국부 평균 연령 및 국부 농도 감소율 등의 환기효율을 수치적으로 해석함으로써 환기 효율의 정량적 접근 방법을 제시하고, 급기 송풍량 및 급기의 유입각의 변화가 실내 유동 형태와 환기 효율에 미치는 영향에 관해서 연구하고자 한다. 환기 효율의 예측을 위한 본 수치적 접근 방법을 이용하여 실제 환기 계통의 효율적인 설계에 응용될 수 있으리라 본다.

2. 해 석

2.1 해석 모델

미네소타 대학내의 열환경 실험실에서 제작된 약 1/2 축소 환기실험 챔버(chamber)가 본 연구의 수치 해석 모델로 이용되었다. 이 환기 실험 챔버(chamber)는 잘 제어된 조건하에서 여러 가지 형태의 환기 실험을 행할 수 있도록 제작

되어 있다. 실험실의 내부 크기는 가로 1.95m, 세로 1.95m, 그리고 높이 1.44m로 내부 벽면은 모두 알루미늄으로 제작되어 있고, 이 알루미늄 벽면 패널들은 온도 조절이 가능하게 설계되어 있다. 2차원 유체유동 조건을 제공하기 위해서 폭 0.05m, 길이 1.95m의 긴 급기구와 배기구가 천정에 설치되어 있다. 급기구와 배기구는 양쪽 벽면으로 부터 중심선까지 각각 0.38m 떨어져 있다. 이 실험실로 공급되는 공기 유량은 최고 0.142m³/s(300cfm)까지 제어될 수 있다. 이 실험 장치에 대하여 Kuehn⁽⁹⁾에 의해서 잘 설명되어져 있다. 배기구에는 리턴그릴(return grille)이 설치되어 있지 않고, 배기구에서의 기류는 천정에 대하여 수직으로 빠져 나가도록 하였다. 유입되는 기류는 디퓨저(diffuser)에 의해서 공기 유입각이 천정으로 부터 45°, 90°, 135°로 조절되는 경우에 대하여 해석하였다. Fig.1은 이 실험실의 형상과 수치해석을 위한 격자계를 보여 주고 있다. 벽면 가까운 곳에서는 비교적 조밀한 간격으로, 그리고 중앙 부분에서는 거의 균일한 간격으로 격자계를 설정하였다. x 방향으로의 격자 수는 28개이고 y 방향으로의 격자 수는 22개가 사용되었다.

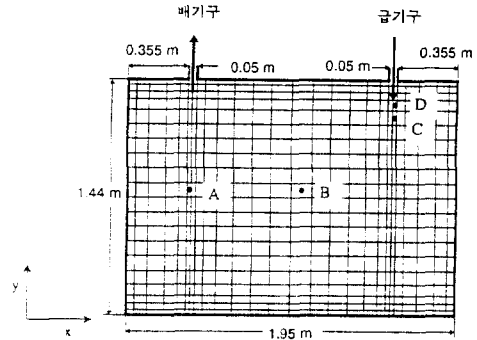


Fig. 1 Configuration of the ventilation chamber shown with grid pattern for the numerical study.

있는 실내 공기 유동 해석에 유리하다. 본 연구에서 사용된 k-ε 방정식은 다음과 같다.

난류 운동 에너지 :

$$u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(v + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(v + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + G - \epsilon - D \dots \dots \dots (1)$$

2.2 정상 상태의 기류 해석

실험실 내의 기류는 앞뒤 벽면에 의한 영향을 무시하고 2차원 유동으로 가정하였다. 정상 상태에서 밀도를 포함한 물성치들이 일정하고 점성 소산이 없는 경우에 대하여 제한 체적 내에서의 연속 방정식과 Navier-Stokes 방정식을 단순화하여 2차원 수직 좌표계에서의 지배 방정식으로 이용하였다. 난류에 관한 항들을 구하기 위하여 Jones와 Launder⁽⁵⁾에 의해 제안된 저 Reynolds수 난류 모델의 k-ε 방정식을 이용하였다. 난류 운동의 해석에 있어서, 연구자에 따라서 그리고 유동 형태에 따라서 이용되는 상수들과 보조식들이 각기 다르게 적용되어 왔는데, 이러한 난류 해석을 위한 k-ε에 관한 여러가지 모델들이 Patel⁽¹⁰⁾에 의해 잘 비교되어져 있다. 특히 저 Reynolds수 난류 모델에서는 벽 함수가 불필요하기 때문에 많은 장애물들이 있을 수

난류 에너지 소산율 :

$$u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(v + \frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(v + \frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + \frac{\epsilon}{k} \{ C_1 G - C_2 \epsilon \} + E \dots \dots \dots (2)$$

여기서,

$$G = \nu_T \left[2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]$$

$$\nu_T = c_\mu k^2 / \epsilon$$

$$D = 2\nu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial x_j} \right)^2$$

$$E = 2\nu\nu_T \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_k} \right)^2$$

그리고 위의 방정식에 사용된 상수와 계수는 다음과 같다.

$$\sigma_k = 1.0$$

$$\sigma_e = 1.3$$

$$C_1 = 1.45$$

$$C_2 = 2.0 [1 - 0.3 \exp(-R_T^2)]$$

$$C_\mu = 0.09 \exp\left(\frac{-2.5}{1 + R_T/50}\right)$$

여기서 $R_T =$ 난류 Reynolds수
 $= k^2/\nu \epsilon$

급기구를 통하여 유입되는 공기의 난류 강도는 1%로 가정되었다. 이 난류 강도는 벽면에 의해 생성되는 난류 생성에 비해 작기 때문에 유입 난류 강도의 가정치에 의해 전체 유동장은 그리 큰 영향을 받지 않는다고 가정하였다. 위의 난류 성분들을 계산하는 k-ε 방정식과 평균 속도 성분들을 결정하는 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식을 각 제한 체적에 적용하여 SIMPLE 방식에 근거한 유한차분법으로 그 해를 구하였다. (11)

2.3 비정상 상태의 농도 분포 해석

비정상 상태의 농도 분포 해석이나 환기효율을 결정하기 위해서 일반적으로 다음과 같은 오염물질의 주입 방법이 사용된다. 첫째 펄스(pulse)방법, 둘째 채증(step-up)방법, 셋째 체강(step-down)방법이 그것이다. 체강 방법은 초기 실내 오염물질의 농도가 균일하게 유지되다가 환기가 시작되면서 신선한 외기가 유입됨에 따라 실내의 오염물질 농도의 감소 양상에 관해 연구하는 방법이다. 본 연구에서는 이방법을 택하였고 초기 농도가 1.0으로 균일하고 외기 농도는 0.0으로 무차원화하였다. 실내 기류는 농도 분포의 영향을 받지 않고 정상적이며, 비정상 농도 분포 계산 과정에서 전혀 변화하지 않는다고 가정하였다. 농도 변화가 심한 계산 초기에는 시간 증분을 작게 취하였다. 난류 Schmidt

수는 1.0으로 취하여 난류 운동에 의한 농도 확산 계수가 난류 점성 계수와 같게 하였다. 실내에는 오염원이 존재하지 않으며 벽면은 완벽하게 밀봉되어 공기 투과가 없다고 가정하였다. 오염 물질의 질량 보존 법칙을 이용하여 다음과 같은 비정상 상태의 농도 방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(D + \frac{v_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(D + \frac{v_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial c}{\partial y} \right] \dots \dots \dots (3)$$

여기서 Sc_T 는 난류 Schmidt수이고 D 는 공기 내에서의 오염물질의 분자 운동에 의한 확산 계수이다. 벽면이나 고체면을 따라서 농도의 구배가 영이 되도록 경계조건을 적용하였다.

2.4 환기 효율

국부 감소율(Local Decay Rate) :

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

$$\rho V \frac{\partial c}{\partial t} = -\rho Q c \dots \dots \dots (4)$$

여기서 ρ 는 공기의 밀도이고, V 는 실내 체적, 그리고 Q 는 공급되는 체적 공기 유량이다. 외기의 농도가 0.0이라고 가정하면 실내의 농도는 시간에 따라 다음과 같이 지수적으로 감소된다.

$$c(t) = c_0 e^{-(Q/V)t} \dots \dots \dots (5)$$

여기서 Q/V 는 단위 시간당 실내 공기의 명목 교환율에 해당되고, 실내 어느 위치에서나 균일한 농도감소가 일어난다. 명목 공기교환율의 역수는 시간의 단위를 갖으며 이를 명목 시간 상수라고 정의할 수 있다.

그러나 실내 공기의 혼합이 완전하지 못할

경우 시간에 따른 농도의 변화는 위치에 따라 다르며 농도 감소율도 일정하지 않다. 앞 절에서 계산한 각 위치에서의 시간 변화에 따른 농도 변화를 반로그 그래프에 그리면 완전 혼합의 경우와 같이 직선 형태로 주어지지 않는다. 각 격자점에서 $\ln[c(t)/c_0]$ 대 시간에 대한 변화를 $-\lambda$ 의 직선식으로 최소자승법(least square fitting)을 이용하여 다음과 같이 국부 농도감소율을 구할 수 있다.

$$c(t) = c_0 e^{-\lambda t} \dots \dots \dots (6)$$

$$\text{여기서 } \lambda = - \frac{1}{t} \ln \left[\frac{c(t)}{c_0} \right] \dots \dots \dots (6)$$

국부 평균 연령(Local Mean Age) :

실내의 공기는 작은 유체 입자들로 구성되어 있다고 가정하고, 그 유체 입자들에 시간의 경과에 따라 연령을 부여한다. 즉, 실내 공기 입자의 연령(age)을 공기 입자가 급기구를 통하여 실내로 유입된 후 경과한 시간으로 정의하고 실내 체류 시간(resident time)은 공기 입자가 배기구를 통하여 외부로 빠져나갈 때의 연령이라 정의할 수 있다. 실내 각 부분은 자기 연령이 다른 공기 입자들의 혼합으로 이루어져 있다고 생각하여 위치별 공기 입자들의 연령 분포를 정의할 수 있다. 이와 같은 공기 입자들은 각 위치에서의 통계 누적 연령분포(cumulative age distribution)와 해당 연령 빈도 분포(age frequency distribution)에 의하여 특성지워진다. 누적 연령 분포는 총 공기 입자 중 연령이 τ 보다 작거나 같은 입자의 비율에 해당하며 무차원 수이다. 연령 빈도 함수는 이 누적 연령 분포의 시간에 대한 미분된 함수로 각 연령의 빈도를 나타낸다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} = \phi(\tau) \text{ 또는 } \int_0^{\tau} \phi(\tau) d\tau = \Phi(\tau) \dots \dots \dots (7)$$

이와 같은 공기 입자의 연령과 연령 분포 함수 등에 관한 개념을 이용하여 환기효율의 특성을 결정지을 수 있다는 것이 Sandberg⁽³⁾에 의해 잘 설명되어져 있다. 이와 같은 공기 입자의 연령 분포를 이용하여 각 실내 위치에서의 국부 평균

연령(local mean age)을 정의할 수 있다. 국부 평균 연령은 연령 분포의 일차 모멘트로서 연령 빈도 함수를 연령으로 가중하여 평균함으로써 구할 수 있고, 또한, 누적 연령 분포를 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \int_0^{\infty} \phi(\tau) \cdot \tau d\tau \\ &= \int_0^{\infty} (1 - \Phi(\tau)) d\tau \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

체강 방식에서 $(1 - \Phi(\tau))$ 의 분포는 초기 농도로 무차원화된 농도 분포와 같다는 것을 쉽게 증명할 수 있다. 즉 국부 평균 연령은 시간에 따른 농도 감소의 적분치에 해당하며 이는 시간 대 농도 곡선의 아래 면적에 해당된다.

$$\mu_0 = \frac{\int_0^{\infty} c(t) dt}{c_0} \dots \dots \dots (9)$$

정상 상태의 농도 분포와 국부 평균 연령 :

오염원이 존재하는 제한체적내에서의 오염 물질 농도에 관한 지배방정식은 백타표현방식을 이용하여 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c = \nabla \cdot (D_{tot} \nabla c) + \dot{m} \dots \dots \dots (10)$$

여기서 \dot{m} 는 오염원의 강도에 해당하며 D_{tot} 는 확산 계수로서 오염 물질의 분자 운동에 의한 분자 확산 계수와 난류 유동에 의한 난류 확산 계수의 합으로 생각할 수 있다. 오염원이 균일하게 분포된 실내에서의 정상 상태 농도 분포를 구하기 위해서 위 식에서 \dot{m} 가 일정한 상수에 대하여 비정상항을 소거하고 연속방정식을 적용하여 정리하면 다음과 같이 단순화할 수 있다.

$$\nabla \cdot \left(\mathbf{u} \left[\frac{c_{\infty}}{\dot{m}} \right] - D_{tot} \nabla \left[\frac{c_{\infty}}{\dot{m}} \right] \right) = 1 \dots \dots \dots (11)$$

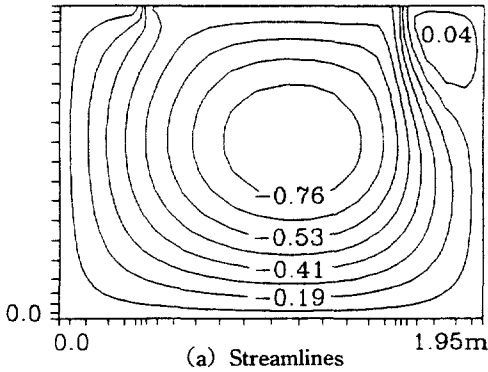
또 체강방식을 이용한 비정상 상태의 지배 방정식은 $\dot{m} = 0$ 으로 하고 초기농도를 c_0 로 하여 위 식을 0부터 t 까지 적분하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\nabla \cdot \left(\mathbf{u} \left[\frac{\int_0^{\infty} c(t) dt}{c_0} \right] - D_{tot} \nabla \left[\frac{\int_0^{\infty} c(t) dt}{c_0} \right] \right) = 1 \dots \dots \dots (12)$$

3. 결과와 토론

명목 공기 교환율이 92ACH일때 정상 상태의

1.44m



실내 기류의 유선분포와 체강방식이 시작되어 실내로 신선외기가 주입되면서 $t=10, 20, 30, 50, 100$ 초 후의 농도분포 변화과정이 Fig.2에 나타나 있다. 이때 급기구에서의 공기속도는 1.44m/s이고 명목 시간 상수는 39초에 해당된다. 실내의 전 공간에 걸쳐서 커다란 공기의 순환이 형성되며 급기구 부근의 부분적인 와류도 형성된다.

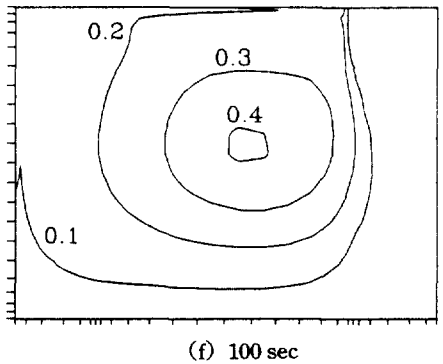
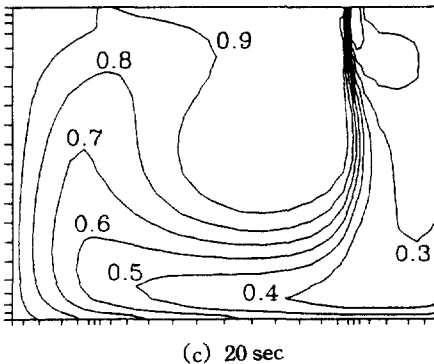
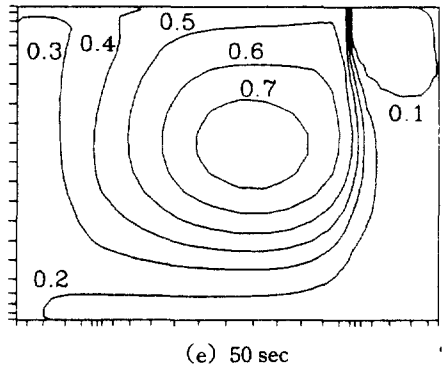
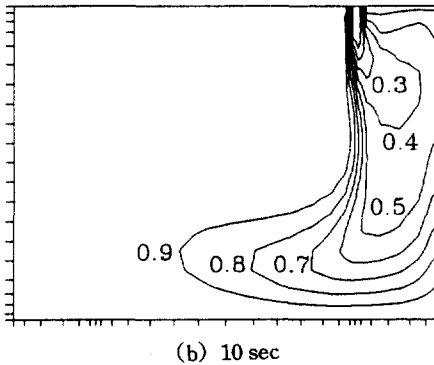
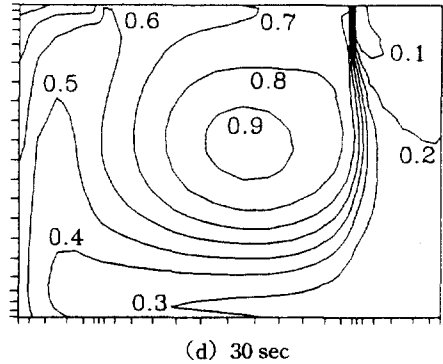


Fig. 2 Streamline pattern and transient concentration distributions at 10, 20, 30, 50 and 100sec after a step-down procedure started (92ACH).

체강 방식이 시작된 초기에 균일한 농도 분포 ($c=1.0$)를 갖는 실내로 신선 외기 ($c=0.0$)가 주입되면서 급기구 바로 인접 구역에서 급격한 농도감소가 일어난다. 차츰 신선외기가 전 실내로 공급되면서 전체적인 실내농도가 감소되며 실내 중앙의 큰 와류 순환 영역 내에서 농도의 최대치가 발생된다.

Fig. 3은 실내 여러 위치에서의 시간에 따른 농도 감소를 나타내고 있다. 이 그림에는 시각 변화에 따른 실내 농도의 평균 값도 중첩되어 그려져 있다. 실내의 평균 농도는 불균일한 실내 농도 분포를 공간적으로 적분하거나 또는 초기 상태부터 구할 수 있다. 또 그림에서 굵은 점선으로 표시되어 있는 것은 실내 공기의 완전 혼합이 이루어진 가상 경우의 농도 변화를 나타낸다. 완전 혼합이 이루어지지 않는 실제 경우에 대해서는 위치에 따라서 각기 다른 농도 변화 형태를 보이며, 이때의 기울기는 완전 혼합이 이루어지는 경우의 농도 감소율에 비하여 현저히 상이하게 나타난다. 초기 20~30초 동안에 각 위치에서의 농도 곡선은 비지수적 감소를 보이며 이러한 초기 비정상 상태가 사라진 후에는 상대적으로 일정한 감소율을 보이고 있다. 이와 같은 농도 감소를 지수 곡선으로 곡선적합(curve fitting)함으로써 국부 농도 감소율을 구할 수 있다.

각 제한 체적에서의 농도 감소율을 전 평면에

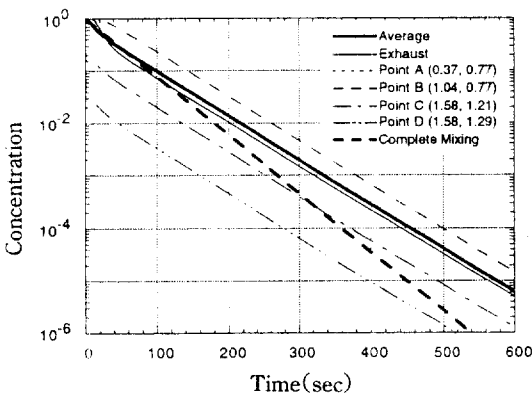


Fig. 3 Transient concentration decay at various locations.

대하여 구한 2차원 국부 농도감소율 분포가 Fig. 4 (a)에 그려져 있다. 국부 감소율은 급기구 주위의 몇몇 제한 체적을 제외하고는 그리 큰 변화를 보이지 않는다. 이 경우에는 전 계산 영역에 걸쳐서 대략 1/46초에서 1/54초 정도의 거의 균일한 분포를 보이고 있다. 참고로 완전 혼합이 이루어지는 경우에 농도 감소율은 1/39초이다. 그림에 나타난 바와 같이 농도 감소율은 전 영역에 대하여 거의 균일한 분포를 보이기 때문에 국부환기 효율을 결정하는데 그리 좋은 척도가 되지 못한다. Fig. 4(b)는 비정상 농도감소 곡선에 시간에 대하여 적분한 값, 즉 이것을 앞절에서 설명한 바와 같이 국부평균 연령의 분포를 나타낸다. 이 농도 곡선의 면적은 각 제한 체적 내에 존재하는 오염물질의 시간에 따른 누적량을 의미하며 초기 농도가 1.0으로 무차원화 되었기

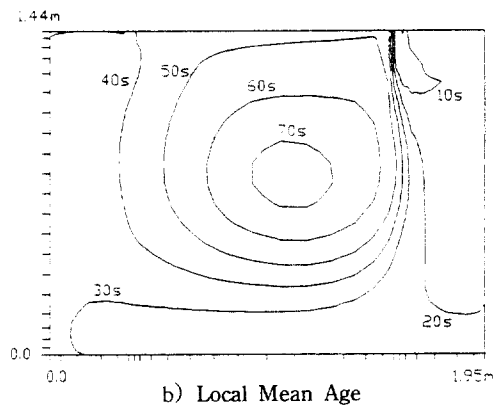
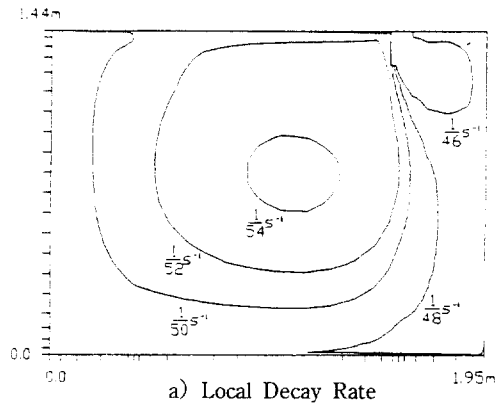


Fig. 4 Distributions of local decay rate and local mean age.

때문에 시간 축 초의 단위를 갖는다. 국부 평균 연령은 이 위치에 약 10초에서 70초 정도의 광범위한 분포를 보이고 있다.

Fig.5는 실내에 균일한 오염원이 존재하는 경우에 대하여 정상 상태의 농도 분포를 보여주고 있다. 오염원의 발생 정도가 단위 공기 질량당 1kg/s의 단위 강도를 갖는 경우에 대하여 계산하였다. 앞절에서 증명한 바와 같이 정상 상태의 농도 분포가 Fig.4(b)와 같이 비정상 상태에서 구한 국부 평균 연령 분포와 동일한 분포를 보인다. 벽면 근처에서의 미세한 차이는 경계 조건이 치장되지 않았기 때문이다.

환기에 관한 실험 연구에서는 정상 상태의 조건을 형성하기가 용이하지 않기 때문에 대부분 실내 오염물질의 농도 변화를 시간 변화에 대하여 측정하는 비정상 상태의 조건을 많이 이용한다. 반면 수치 해석 연구에서는 일반적으로 비정상 상태의 계산은 정상 상태의 계산에 비하여 난이한 것이 보통이며 더 많은 계산 시간과 커다란 데이터 기억 용량을 요구한다. 따라서 국부 연령을 구할 때 비정상 상태의 계산 결과를 이용하여 농도 곡선의 면적을 구하는 것보다 정상 상태의 균일 오염원 분포시의 정상 상태 농도 분포를 구하는 것이 계산 결과의 수렴이 빠르며 프로그램하기도 용이하다.

Fig.6, 7, 8은 명목 공기 교환율이 65ACH일 때 급기구에서의 공기 유입각에 따른 실내 유선 분포와 국부 평균 연령 분포를 보여주고 있다. 이 때 급기구에서의 공기 속도는 1.02m/s에 해당되며 명목 시간 상수는 55.2초이다. 유입각이 90°일때 실내 전체에 걸친 커다란 실내 공기 순환을 보이며 흡입구 옆 부근에도 작은 공기 순환을 보인다. 급기구로 유입된 공기는 실내 공기와 매우 잘 혼합되고 효과적으로 외기를 실내로 공급해 준다. 유입각이 45°일때에 유선의 분포는 유입각이 90° 일때와 유사하나, 국부 평균 연령은 Fig.7(b)에 나타난 바와 같이 유입각이 90°일 때에 비하여 상당히 크게 나타난다. 한편, 유입각이 135°일때, 즉 유입각이 배기구 쪽으로 45° 기울어져 향해 있을 때의 실내의 유선분포는 앞의 두 경우와 판이한 양상을 보인다. 유입된

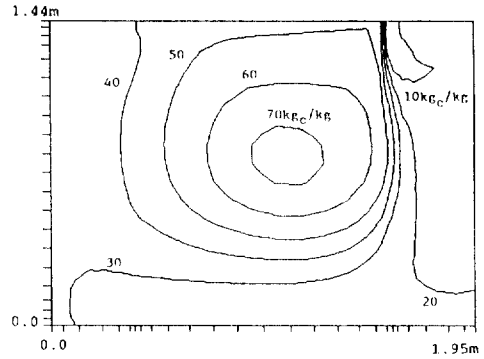
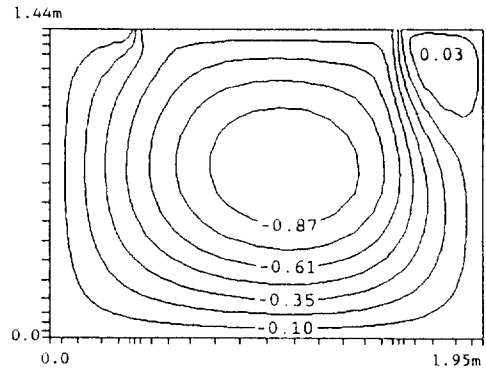
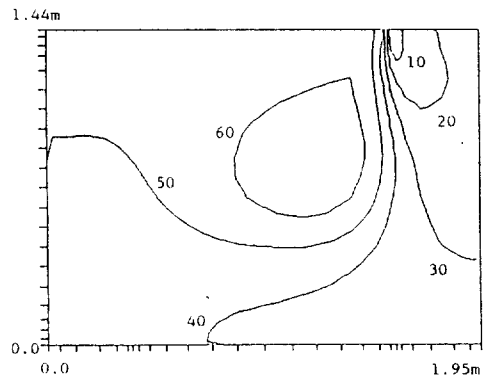


Fig. 5 Steady state concentration distribution with homogeneously distributed contaminant sources in the space.

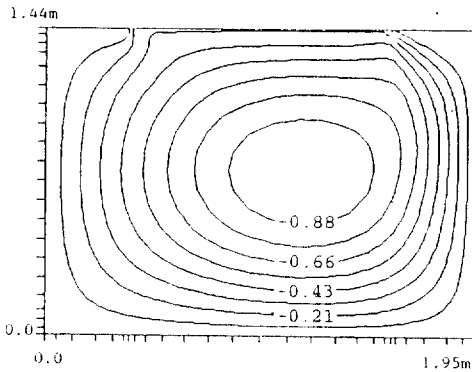


a) Streamline

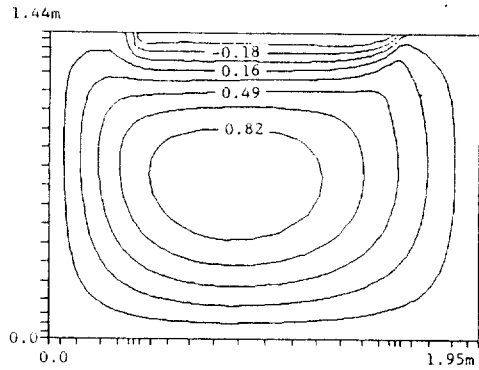


b) Local Mean Age

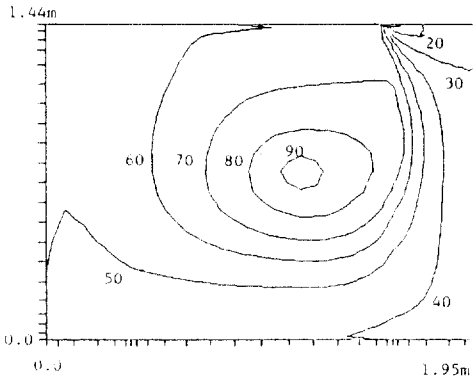
Fig. 6 Streamline and local mean age for diffuser angle of 90° (65.2ACH)



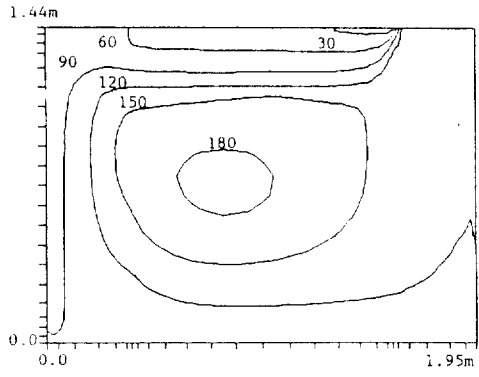
a) Streamline



a) Streamline



b) Local Mean Age



b) Local Mean Age

Fig. 7 Streamline and local mean age for diffuser angle of 45° (65.2ACH)

Fig. 8 Streamline and local mean age for diffuser angle of 135° (65.2ACH)

공기는 실내 공기와 혼합이 잘 이루어지지 않으며 천정을 따라서 많은 부분이 직접 배기구로 빠져 나간다. 신선 외기는 환기를 필요로 하는 실내의 중앙으로 효과적으로 공급되지 못하며 실내의 오염된 공기는 효과적으로 배기구로 배출되지 못한다. 유입된 공기는 실내의 공기를 유체 마찰력에 의하여 간접적으로 유동시키며 신선 외기는 분자 확산에 의해 실내의 중앙으로 전파되어 간다. 이 경우의 국부 평균 연령이 Fig.8 (b)에 나타나 있다.

국부 평균 연령의 분포를 전 실내공간에 걸쳐 적분함으로써 전체적인 환기시스템의 효율을 정량화 할 수 있다. 즉 전 실내공간에 걸친 국부 평균 연령의 평균치를 실내평균연령이라 하고

Table 1 Comparison of ventilation effectiveness for different diffuser angles

Diffuser angle	Room average of μ_0	Nominal time constant, τ_n	Air diffusion efficiency τ_n/μ_0
90°	49.0 sec	55.2 sec	1.13
45°	56.1 sec	55.2 sec	0.98
135°	125.6 sec	55.2 sec	0.44

명목시간상수와와의 비를 공기확산계수라고 정의한다. 위의 세 경우에 대하여 공기확산계수의 값이 Table 1에 나타나 있다. 완전혼합이 이루어지는 경우 공기 확산계수는 1.0이며 전혀 혼합이 이루어지지 않는 경우인 변위환기의 경우의 공기 확산계수는 2.0이다. 유입각이 90°일때의

공기확산계수는 1보다 크며 완전혼합의 경우보다 더 효율적이다. 유입각이 135°일 때 위의 세 경우중 가장 비효율적인 환기가 이루어지고 있다고 말할 수 있다.

4. 결 론

난류 형태의 실내 공기의 유동장을 계산하여 비정상 상태와 정상 상태의 농도 분포를 계산함으로써 환기 효율을 특성짓는 국부 평균 연령과 국부농도 감소율분포를 구하는 수치적 방법을 제시하였다.

균일한 오염원이 존재하는 실내에서의 정상 상태의 농도 분포는 비정상 상태에서 구한 농도-시간 곡선의 아래 면적 즉 국부 평균 연령과 일치하는 것을 수치적으로 증명하였다. 국부 평균 연령을 구하기 위하여 수치적으로 용이한 정상 상태의 계산 방법을 이용할 것을 제안한다.

국부 평균 연령으로 정의된 환기 효율은 본 계산에서 전 실내 영역에 걸쳐서 위치에 따라 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 명목 공기 교환율을 이용한 환기 설계는 응용 대상에 따라서 국부적으로 만족스럽지 못한 결과를 초래할 수 있다. 국부적 환기 효율을 결정함에 있어서 국부 평균 연령을 이용하는 것이 위치에 따라 변화가 작은 국부 농도 감소율을 이용하는 것보다 바람직하다.

본 연구에서 제시된 수치적 방법을 이용하여 환기의 효율성을 결정짓는 공기 교환율 급기구와 배기구의 위치, 오염원의 특성 등의 변수들에 관한 영향을 연구함으로써 환기 계통의 보다 효율적인 설계에 응용할 수 있다.

후 기

이 논문은 1991년도 한국학술진흥재단의 자유훈조과제 연구비 지원으로 연구되었으며 이에 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

- ASHRAE 62-1991, ASHRAE Standard, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
- Sandberg, M., 1981, "What is Ventilation Efficiency," *Building and Environment*, Vol.16, No.2, pp.123-135.
- Sandberg, M., 1983, "Ventilation Efficiency as a Guide to Design," *ASHRAE Trans.*, Vol.89, Pt.2B, pp.455-479.
- Skaret, E. and Mathisen, H.M., 1983, "Ventilation Efficiency as a Means of Characterizing Air Distribution in a Building for Indoor Air Quality Evaluation," *ASHRAE Trans.* Vol.89, Pt.2B, pp.496-505.
- Jones, W.P., and Launder, B.E., 1973, "The Calculation of Low-Reynolds Number Phenomena with a Two-Equation Model of Turbulence," *Int. J. Heat and mass Transfer*, Vol.16, pp.1119-1130.
- Lam, C.K.G. and Bremhorst, K.A., 1981, "Modified form of the k-ε Model for Predicting Wall Turbulence," *Journal of Fluid Engineering*, Vol.103, pp.456-460.
- Baker, A.J., and Kelso, R.M., 1990, "On Validation of Computational Fluid Dynamics Procedures for Room Air Motion Prediction," *ASHRAE Trans.*, Vol.96, Pt.1, pp.760-774.
- Chen, Q., and Moser, A., and Huber, A., 1990, "Prediction of Buoyant, Turbulent Flow by a Low-Reynolds-Number k-ε Model," *ASHRAE Trans.*, Vol.96, Part 1, pp.564-573.
- Kuehn, T.H., Ramsey, J.W., Han, H., Perkovich, M., and Corpron, M., 1991, "Experimental Study of Airflow Patterns and Ventilation Effectiveness in a Half-Scale Office Building," *Proc.3rd Int. Symposium on Ventilation for Contaminant Control*.
- Patel, V.C., Rodi, W., and Scheuerer, G., 1984, "Turbulent Models for Near-Wall and Low Reynolds Number Flows : a Review," *AIAA Journal*, Vol.23, No.9, pp.1308-1319.
- Patankar, S.V., 1980, '*Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*,' McGraw-Hill Book Co.