

## 역유동계산법을 이용한 국소배기효율의 수치해석

### Numerical analysis of local exhaust effectiveness using reverse-flow calculation method

한 화 택\*  
H. T. Han

**Key words :** Ventilation effectiveness(환기효율), Room airflow(실내기류), Exhaust(배기), Numerical analysis(수치해석), Residual-life-time(잔여체류시간), Reverse-flow calculation method(역유동계산법)

#### Abstract

This paper investigates local exhaust effectiveness in a room with a supply and an exhaust slots on the ceiling. The mean age of air is an indicator of supply effectiveness, while the mean residual life time can be used as an indicator of exhaust effectiveness. The distribution of local mean residual life time in a space is calculated by four different numerical procedures. The reverse-flow calculation method has been proved to show quite accurate results while it can save considerable amount of computation time and efforts, compared to the method by its original definition. It is concluded that the diffusion term in the equation of mean residual life time can be neglected. The spatial and temporal diffusion characteristics of the contaminant are also discussed.

#### 기 호 설 명

c	: 농도	L	: 실내공간의 길이
$c_{ex}$	: 배기구에서의 농도	LMA	: 국소 평균연령(Local mean age)
$c_{in}$	: 급기구에서의 농도	LMR	: 국소 평균 잔여체류시간(Local mean residual-life-time)
$c(\infty)$	: 정상상태의 농도	m	: 오염원 발생률
d	: 급기구 및 배기구의 폭	M	: 실내 오염보유량(hold-up)
D	: 오염원의 확산계수	Q	: 환기량
h	: 급기구 및 배기구의 벽면으로부터의 거리	t	: 시간
H	: 실내공간의 높이	$u_j$	: 속도벡터
		V	: 실내 체적
		$x_j$	: 위치벡터

\* 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부

그리스문자

- $\rho$  : 공기의 밀도
- $\tau_n$  : 명목시간상수(=V/Q)

1. 서 론

환기는 실내의 오염물질을 제거하고 신선외기를 공급하는 수단으로 실내의 공기질 환경을 제어하기 위하여 활용되고 있다. 강제환기를 위해서는 동력이 소요되므로 최소의 송풍전력을 이용하여 필요한 신선외기를 적절히 공급하고 오염물질을 효과적으로 제거하기 위하여 환기의 효율성이 고려되어야 한다. 환기효율은 적용 목적에 따라서 여러 가지 방법으로 정의되고 있다.

환기효율이란 용어는 Yaglou와 Witheridge<sup>(1)</sup>가 처음 사용하였으며 배기구의 농도에 대한 실내의 농도비로 정의하였다. 농도비를 이용한 환기효율의 정의는 실내의 기류상태 뿐만 아니라 오염원의 실내 분포에 의존하는 양으로서 실내 각점에서의 환기상태라기보다는 그 지점에서의 오염상태를 의미하게 된다. 오염원의 위치와 무관하게 실내의 환기 특성을 나타낼 수 있는 양으로서의 환기효율은 오염농도의 감소율(decay rate) 또는 공기나 오염물질의 연령(age)을 주로 이용하고 있다. Sandberg<sup>(2,3)</sup>는 평균연령의 개념을 도입하여 여러 가지 환기효율을 설명하였으며 이를 측정하기 위한 방법들을 제시하였다. 또한 이러한 정의에 근거하여 최근 실내의 환기효율을 수치해석적으로 예측하기 위한 연구가 계속 진행되고 있다.<sup>(4)</sup> Han<sup>(5)</sup>은 실내기류의 수치해석 결과를 이용하여 비정상상태의 농도변화를 계산함으로써 국소감소율과 국소평균연령의 분포를 정량적으로 구하는 방법을 제시하였으며, 국소평균연령이 실내 환기효율의 분포를 나타내는데 보다 적합한 지표임을 보고하였다. 이렇게 구한 환기효율은 신선외기가 얼마나 빨리 실내공간의 임의의 점까지 도달하느냐 하는 급기효율에 해당하며, 배기가 중요한 경우에 있어서 배기성능을 표시하지는 못한다. 배기의 효율을 고려하기 위해서는 실내의 임의의 점에서 발생한 오염원이 효율적으로 배기구까지 도달하는가 하는 것을 고려하여야 한다.

배기의 효율을 나타내기 위한 평균잔여체류시간을 구하기 위하여 Kato<sup>(6)</sup>등은 역시간계산법에 의한 방법을 제안하였다. 그러나 실제로 이 방법의 적용시 확산계수가 음으로 되므로 수치해석상 수렴이 대단히 어렵거나 불가능하기 때문에 현실적인 방법이 되지 못하였다.

본 연구에서는 실내보유량, 배기구 농도 등의 상관관계를 이용하여 실내 각 위치에서의 국소배기효율을 나타낼 수 있는 평균잔여체류시간을 계산하기 위한 여러 가지 방법에 관하여 고찰하고자 한다. 특히 역유동계산법을 이용하여 평균 잔여체류시간을 해석하는 방법을 제시하고 해의 정확도에 관하여 검토해 보고자 한다.

2. 이론적 해석

2.1 기류해석

본 연구에서 실내의 환기효율을 해석하기 위하여 사용된 공간의 높이 2.4m, 길이 4m인 2차원 사각공간으로 하였고, 폭 5cm의 급기슬롯과 배기슬롯이 천장에 대칭으로 존재하는 경우에 대하여 고려하였다. 이는 전형적인 사무실 공간을 단순화하여 모사한 것으로 본 연구의 목적이 실내기류의 정확한 해석 보다는 실내기류를 이용하여 환기효율에 관한 각종 개념과 수치해석적 방법을 고찰하기 위한 것이므로 다소 단순화된 해석 공간을 설정하였다. 급기구와 배기구는 벽으로부터 0.75m 떨어져 위치하고 있다. Fig.1에 급기구와 배기구의 위치를 포함한 해석공간과 사용된 격자계가 나타나 있다. 격자계는 66×36개의 직각 격자계를 사용하였고 벽면, 급기구 및 배기구 근처에서 조밀한 격자가 되도록 구성하였다.

해석을 단순화하기 위하여 작동유체인 공기의 밀도를 포함한 모든 물성치는 일정하다고 가정하였고, 유동은 정상상태이며 오염원에 의하여 영향을 받지 않는다고 가정하였다. 이와같은 가정하에서 제한체적내의 연속방정식과 운동량 방정식을 단순화하여 지배방정식으로 이용하였다. 속도 경계조건으로 벽면에서 점착조건을 적용하였고 또한 벽면에서 농도구배를 0으로 하여 오염물의 투과가 없는 것으로 가정하였다. 난류에 관한 양들을 구하기 위하여

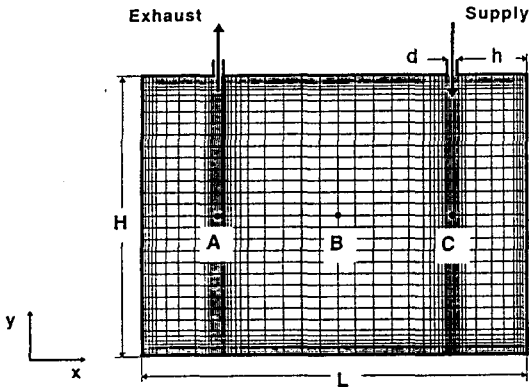


Fig.1 Configuration of the room shown with the grid pattern

Jones와 Launder<sup>(7)</sup>에 의한 표준  $k-\epsilon$  방정식을 이용하였고 벽면 근처에서 벽 법칙을 사용하였다. 급기구를 통하여 유입되는 공기의 난류강도는 1%로 설정하였다. 이는 벽면에서 생성되는 난류생성에 비해 매우 작기 때문에 전체 유동장은 가정된 유입난류 강도 값에 그리 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 난류성분을 계산하기 위한  $k-\epsilon$  방정식과 연속방정식, 그리고 Navier-Stokes 방정식을 각 제한체적에 적용하여 SIMPLE 방식<sup>(8)</sup>에 근거한 유한차분법으로 그 해를 구하였다.

## 2.2 급기효율

해석된 실내기류속도로부터 환기효율을 해석하기 위하여 평균연령의 개념을 이용하였다. 급기의 평균연령, 즉 신선급기가 급기구로부터 실내 임의의 점까지 도달하는데 소요되는 시간의 평균은 그 지점에서의 국소 급기효율을 표시하는 지표로 이용될 수 있다. 급기의 평균연령은 잘 알려진 바와 같이 연령분포의 일차모멘트로서 연령빈도함수를 연령으로 가중하여 적분하는 것으로 정의된다. 그런데 실내 각점에서의 누적연령분포는 체송방식에서의 무차원 농도변화과정과 동일하므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$LMA = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{c(t)}{c_{in}}\right) dt \quad (1)$$

또는 참고문헌 (5)에서 보인 바와 같이 국소평균연

령은 실내공간상에 균일한 오염원이 존재할 때의 정상상태 농도분포와 동일하다는 것을 이용하여 다음의 식으로부터 계산할 수도 있다.

$$u_j \frac{\partial(LMA)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ D \frac{\partial(LMA)}{\partial x_j} \right] + 1 \quad (2)$$

여기서  $D$ 는 확산계수로서 난류해석의 경우, 층류 확산계수와 난류 확산계수를 합한 값을 이용한다. 이렇게 구한 국소평균연령과 명목시간상수와의 비, 즉 무차원 평균연령의 역수는 그 지점에서의 국소 급기효율의 의미를 갖는다.

## 2.3 배기효율

앞의 평균연령의 개념으로는 실내 각점의 배기상태를 표시하기에는 적합하지 못하다. 배기의 효율은 실내에서 발생한 오염물질이 얼마나 빨리 배기구로 배출되느냐 하는 것으로 나타내야 한다. 여기서는 실내의 임의의 위치에서 발생한 오염물질이 기류에 실려 배기구까지 도달하는 시간, 즉 잔여 체류시간을 이용하여 나타내고자 한다. 잔여체류시간의 해석에 있어서도 평균연령의 해석에서와 마찬가지로 각기 다른 경로를 통하여 배기구까지 도달할 수 있으므로 발생 오염원에 대한 빈도함수와 누적분포를 고려하여 평균 잔여체류시간(mean residual life time)을 계산한다. 이것은 잔여체류시간의 빈도함수에 대한 일차모멘트에 해당한다. 또한 평균연령의 계산에서와 마찬가지로 잔여체류시간의 누적분포는 체송방식에서 오염발생에 의한 배기구에서의 무차원 농도변화와 동일하다. 따라서 평균 잔여체류시간은 배기구에서의 농도변화를 시간에 관하여 적분함으로써 구할 수 있다.(Method 1)

$$LMR = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{c_{ex}(t)}{c_{ex}(\infty)}\right) dt \quad (3)$$

배기구에서의 농도는 실내로부터의 오염물질의 제거율에 비례한다. 또한 실내공간내에 존재하는 오염물질의 양을 실내보유량(hold-up)이라고 하는데 실내오염발생율이 일정한 경우 실내보유량의 변화율은 배기구를 통한 오염물질의 제거율과 부호가 반대이다. 따라서 이러한 실내보유량과의 관계로부터 평균잔여체류시간은 체송방식에 의한 비정상상

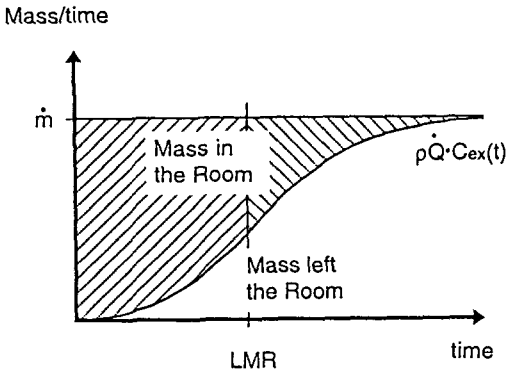


Fig.2 Relation between mean residual life time and hold-up

태가 사라진 후 정상상태 오염농도의 실내분포를 적분함으로써 구할 수도 있다. (Method 2)

$$LMR = \frac{M(\infty)}{\dot{m}} = \frac{1}{Q} \int_V \frac{c(\infty) dV}{c_{ex}(\infty)} \quad (4)$$

평균 잔여체류시간과 실내 보유량의 개념이 Fig. 2에 의하여 잘 나타나 있다.

### 2.4 역유동계산법

국소평균 잔여체류시간을 구하기 위해서는 그 정의에 따라서 채송방식에 의한 비정상상태의 배기구 농도를 시간에 대하여 적분하거나(Method 1), 정상상태의 실내농도를 적분하여 실내보유량을 구하여야 한다.(Method 2) 이렇게 하여 구한 평균잔여 체류시간은 오염이 발생된 그 위치에서의 값에 해당하므로 국소 평균잔여체류시간의 공간적 분포를 구하기 위해서는 위의 계산을 실내 모든 점에 대하여 반복하여야 하며 많은 계산시간과 데이터 저장 공간을 요한다.

이를 해결하기 위하여 역유동법에 의한 평균 잔여체류시간 계산법을 제안하고자 한다. 평균 잔여 체류시간이란 임의의 점을 지나는 공기입자가 배기구를 빠져나갈 때까지의 평균시간인데 이는 유동의 방향을 역방향으로 취했을 때 배기구에서 들어오는 공기입자가 다시 그 점까지 도달하는데 걸리는 평균시간이라고 가정할 수 있다. 즉, 시간이 거꾸로 흐를 때 배기구를 통하여 역으로 들어오는 공기가

그 지점까지 도달하는데 필요한 평균연령을 계산하는 것과 같은 방법을 취할 수 있다. 이렇게 함으로써 한번의 계산으로 전 공간에 걸친 평균 잔여체류시간의 분포를 계산할 수가 있다. 이와같은 역시간법은 유동의 방향을 반대로 취하고 오염물의 확산계수로 음의 값을 사용하는 것과 마찬가지로인데, 여기서 확산계수가 음의 값을 가지면 농도장의 수치해석상 수렴의 문제가 발생하게 된다. 따라서 유동의 방향만 역으로 취하고 확산계수는 그대로 양의 값을 취하는 역유동법을 사용함으로써 이와같은 수렴의 문제를 해결하고자 한다. 오염원의 확산정도를 표시함에 있어서 실내의 임의의 점에서 발생한 오염원이 배기구에 도달하였을 때의 확산정도는 역유동시 배기구에서 발생한 오염원이 그 점까지 도달할 때의 확산 정도와 같다고 가정한다.

$$(-u_j) \frac{\partial(LMR)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ D \frac{\partial(LMR)}{\partial x_j} \right] + 1 \quad (5)$$

또한 이와 같이 역유동에 대하여 비정상상태하에서의 농도의 적분값을 구하는 것(Method 3)보다 평균연령을 구할 때와 마찬가지로 실내의 균일한 오염원이 존재한다고 가정하고 역유동에 대한 정상상태의 농도분포를 구하는 것이 더욱 용이하다.(Method 4) 즉, 한번의 정상상태의 농도계산으로 전공간에 걸친 평균 잔여체류시간의 분포를 구할 수 있다. 이와 같은 네가지 해석방법에 대한 것이 Table 1에 요약되어 있다.

Table 1 Four different methods to calculate LMR

Method	Flow direction	Time-wise	Source generation	Concentration monitoring
1	Normal	Transient	Internal point, P	Exhaust
2	Normal	Steady	Internal point, P	Spatial average
3	Reverse	Transient	Exhaust	Internal points
4	Reverse	Steady	Uniformly distributed	Internal points

3. 결과와 토론

Fig.3은 난류해석에 의한 실내공간내의 유선분포를 보여주고 있다. 이 경우 급기구의 속도가 1m/s로 하였고 급기구의 크기가 0.05m이므로 단위 깊이당 총 급기량은 0.05m<sup>3</sup>/s이다. 전체 실내공간의 부피가 9.6m<sup>3</sup>이므로 명목 시간상수(nominal time constant)는 192초에 해당하고 시간당 환기율은 18.75ACH이다.

실내의 A, B, C 각 점에서 원래의 정의에 따라 잔여체류시간을 계산하기 위하여 각각의 점에 오염원을 위치시키고 체승방법에 따라 비정상상태의 계산을 수행하였다.(Method 1) Fig.4는 시간에 따른 배기구에서의 농도변화를 보여준다. 여기서 농도는 정상상태의 배기구 농도로 무차원화되어 있다. 이

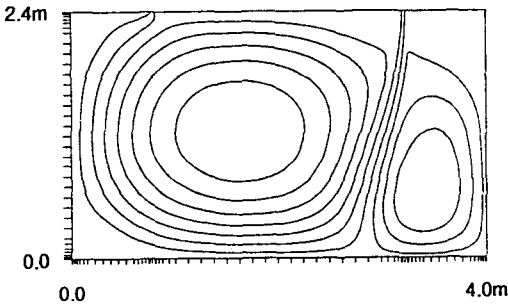


Fig.3 Streamline distribution calculated by turbulence modeling

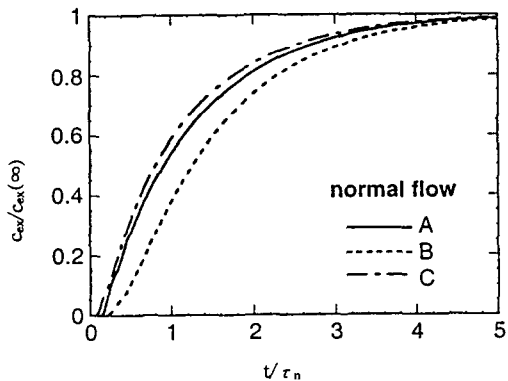
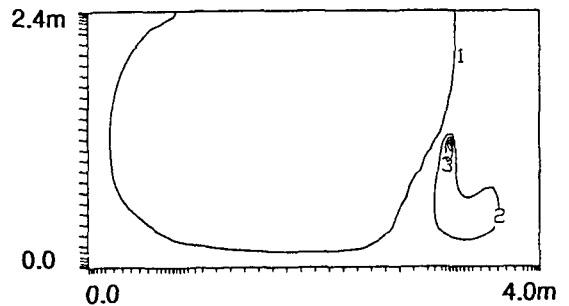
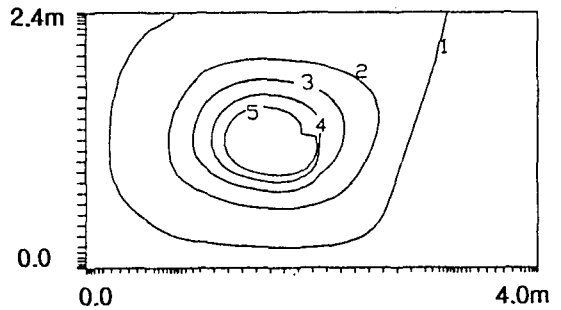


Fig.4 Exhaust concentration variations with step-up generation at points, A, B, and C

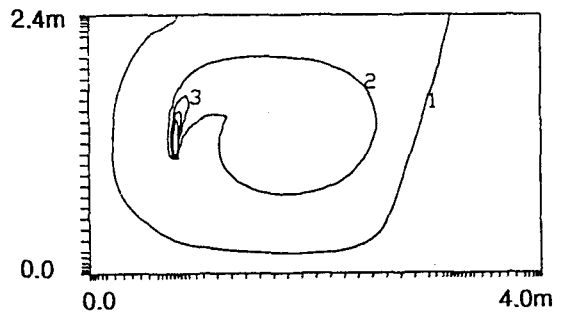
농도변화로부터 각 점에서의 무차원 평균잔여체류시간을 구하면 A점에서 1.034, B점에서 1.302, C점에서 0.943으로 계산되었다. A점에서의 평균 잔여체류시간이 오히려 C점에서의 값보다도 크게 나타나는 것은 특기할 만 하다. 이것은 배기구 바로 아래에 오염원이 위치할 지라도 유선이 직접 배기구를 향하고 있지 않으면 오히려 멀리 위치한 곳보



(a) Source at A



(b) Source at B



(c) Source at C

Fig.5 Steady state concentrations with contaminant sources at points, A, B, and C

다도 평균잔여 체류시간이 길어질 수 있음을 의미한다.

Fig.5는 각각의 점에서의 오염발생에 의한 정상상태에 도달하였을 때의 농도분포를 보여주고 있다. (Method 2) 여기서 무차원농도가 1인 곡선을 기준으로 완전혼합이 이루어질 경우보다 농도가 높은 영역과 낮은 영역으로 구분된다. 이때 오염원의 위치에 관계없이 배기구에서의 농도는 동일하며 이것은 완전혼합이 이루어진다고 가정하였을 때의 실내 농도와 같다. 정상상태의 농도분포를 공간 적분하여 실내공간내의 오염물 보유량을 구할 수 있고, 이로부터 평균 잔여체류시간을 구하면 Fig.4에서의 비정상상태로부터 구한 값과 정확히 일치하는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 정상상태의 해석이 비정상상태의 해석보다 용이하므로 임의의 점에서의 평균 잔여체류시간을 구하기 위해서는 정상상태의 실내 보유량 해석을 이용하는 것이 보다 용이하다고 말할 수 있다.

그러나 이미 언급한 바와 같이 실내 공간상의 모든 점에서의 전체 배기효율 분포를 구하기 위해서

는 각 점에 오염원을 위치시키고 위의 계산을 격자수만큼 반복하여야 하는 번거로움이 있기 때문에 역유동계산을 수행하였다. 유동방정식은 선형이 아니므로 실내의 기류속도를 역방향으로 취한 경우에 대한 유동결과는 단순히 급기구와 배기구의 위치를 바꾼 상태로 구한 유동해석 결과와는 상이하다. 즉 급기구 부근의 유동은 큰 운동량을 갖고 제트 형태로 유입이 되고 있는 반면 배기구 부근에서는 운동량의 크기가 작고 비점성유동에 의한 포텐셜 유동과 유사한 경향을 보인다.

Fig.6에서는 역유동시의 평균연령, 즉 정방향 유동에 대한 평균 잔여체류시간을 구하기 위하여 배기구에 오염원을 위치시킨 경우 체송방식을 이용한 비정상상태의 농도변화과정을 보여주고 있다. (Method 3) 이때 실내 각점에서의 농도변화과정은 Fig.4에 나타난 정방향의 배기구 농도변화 결과와 잘 일치하고 있다. 이때 계산된 실내의 A, B, C점에서의 무차원 평균잔여체류시간은 각각 1.036, 1.304, 0.945로서 앞에서 Method 1,2로부터 구한 1.034, 1.302, 0.943과 매우 근사하다. 이러한 해석결과의 차이는

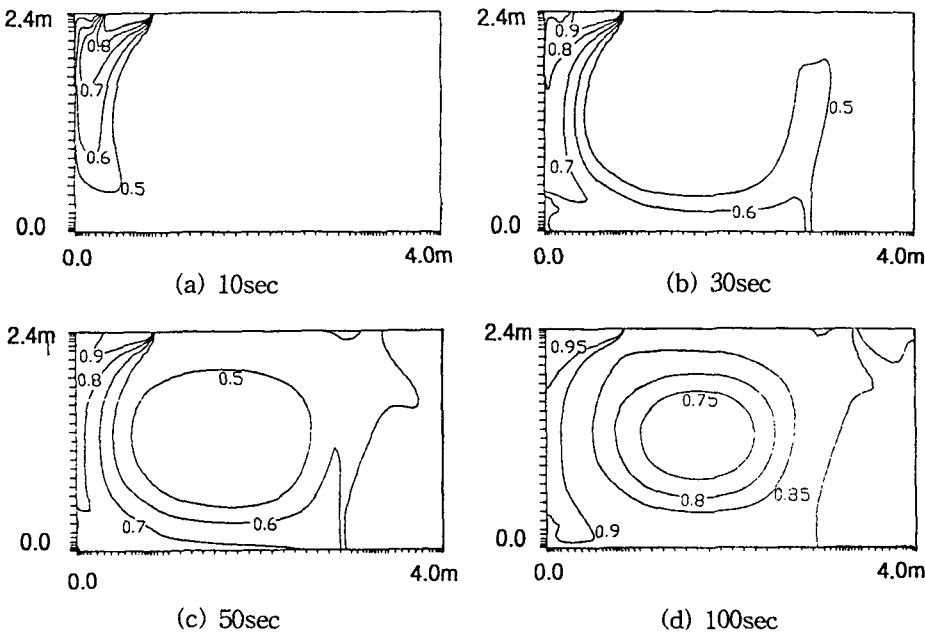
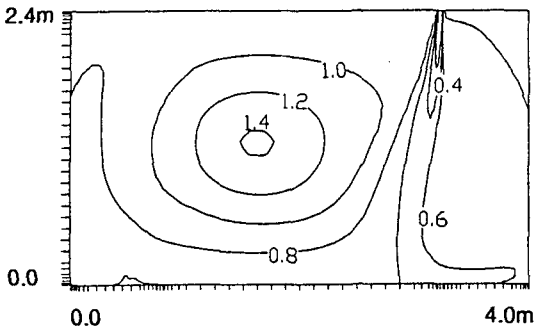
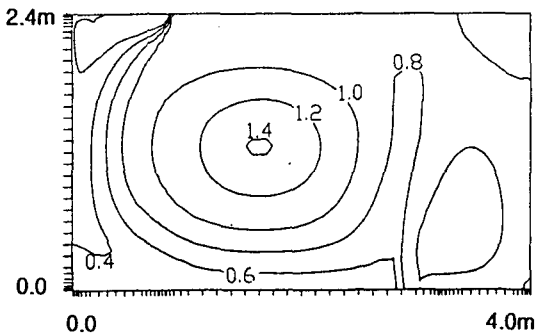


Fig.6 Transient concentration distributions for a step-up generation at exhaust with the flow direction reversed



(a) Local residual lift time(LMR)



(b) Local mean age(LMA)

Fig.7 Distributions of dimensionless LMR and LMA

확산계수의 부호 변화에 의하여 발생한 것으로 대부분의 환기효율의 계산에 있어서 확산항의 영향은 매우 적다고 말할 수 있다. 이것은 참고문헌 (4)에서 평균연령의 해석과정에서 밝힌 결론과도 일치하는 것이다.

Fig.7a는 역유동시 실내에 균일한 오염원이 분포되어 있을 때의 역유동에 의한 정상상태 농도분포로부터 구한 실내 평균잔여체류시간의 분포를 보여주고 있다.(Method 4) 여기서의 값들은 모두 명목시간상수로 무차원화된 값이다. 무차원 평균잔여체류시간이 1보다 큰 영역은 완전혼합에 의한 경우보다 배기가 잘 되지 않는 영역이며 1보다 작은 영역은 그 반대이다. Fig.7b에는 실내의 무차원 평균연령 분포가 비교하여 나타나 있다. 이것은 실내의 급기효율을 나타낸 것으로 배기효율의 분포와는 서로 다른 분포를 보인다. 배기구와 급기구 주위에서 특히 상이한 분포를 보이며 실내 중앙부분에서

는 비교적 유사한 분포를 보인다. 쉽게 예상할 수 있는 바와 같이 급기구 근처에서는 급기효율이 매우 좋은 것으로 나타나며 배기구 근처에서는 배기효율이 좋은 것으로 나타나고 있다.

#### 4. 결 론

급기구와 배기구가 천장에 있는 실내공간에 대하여 난류형태의 기류해석을 수행하였고 이를 이용하여 배기효율을 나타낼 수 있는 평균잔여체류시간을 해석하기 위한 여러 가지 접근 방법을 제시하였다.

1) 환기효율은 급기의 성능을 표시하는 급기효율과 배기의 성능을 표시하는 배기효율로 구분하여 고찰할 수 있으며 각각은 오염원의 위치에 관계없이 실내기류형태에 의하여 결정되는 평균연령과 평균잔여체류시간을 이용하여 표현할 수 있다.

2) 평균 잔여체류시간을 구하기 위하여 역유동계산법을 제안하였고 계산된 결과는 비정상상태에서의 농도분포를 적분한 결과나 정상상태의 실내보유량으로부터의 계산결과와 잘 일치하였다.

3) 역유동계산법을 이용함으로써 해석 절차를 상당히 단순화시켜 전 실내공간에 걸친 평균잔여체류시간의 분포를 용이하게 계산할 수 있다.

4) 확산항에 의한 영향은 대부분의 공학적 계산에서 무시될 수 있으며, 국소평균연령과 국소평균잔여체류시간의 계산시 다음과 같은 단순화된 수식을 이용할 수 있다.

$$u_j \frac{\partial(LMA)}{\partial x_j} = 1 \quad (6)$$

$$u_j \frac{\partial(LMR)}{\partial x_j} = -1 \quad (7)$$

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 지원(과제번호: 961-1008-070-2)으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Yaglou, C. P. and Witheridge, W. N., 1937,

- "Ventilation requirements," Part 2, ASHRAE Trans. Vol. 42, pp. 423~436.
2. Sandberg, M., 1981, "What is ventilation efficiency," Building and Environment, Vol. 16, No. 2, pp. 123~135.
  3. Sandberg, M., 1983, "Ventilation efficiency as a guide to design," ASHRAE Trans., Vol. 89, Pt. 2B, pp. 455~479.
  4. Matsumoto, H. and Kato, M., 1992, "A numerical method for predicting age-of-air in rooms," Proc. of Int. Symp. on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, pp. 193~197.
  5. Han, H., 1994, "Numerical analysis of ventilation effectiveness using turbulent airflow modeling," J. of SAREK, Vol. 2, pp. 41~49.
  6. Kato, S., Murakami, S., and Kobayashi, H., 1992, "New scales for evaluating ventilation efficiency as affected by supply and exhaust openings based on spatial distribution of contaminant," Proc. of Int. Symp. on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, pp. 177~186.
  7. Jones, W. P. and Launder, B. E., 1972, "Some properties of sink flow turbulent boundary layers," J. of Fluid Mechanics, Vol. 56, pp. 337~351.
  8. Patankar, S. V., 1980, 'Numerical Heat Transfer and Fluid Flow,' McGraw-Hill, New York.