

실내 기류패턴에 따른 급기효율과 배기효율의 분포

한 화 태[†], 최 선 호^{*}, 장 경 진^{**}

국민대학교 기계자동차공학부, *국민대학교 기계공학과 대학원, **여수공업대학교 기계설계학과

Distributions of Local Supply and Exhaust Effectiveness according to the Room Airflow Patterns

Hwataik Han[†], Sun-Ho Choi^{*}, Kyung-Jin Jang^{**}

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea

^{*}Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kookmin University, Seoul, Korea

^{**}Department of Mechanical Design, Yosu Technical College, Yosu, Korea

(Received June 28, 2000; revision received June 11, 2001)

ABSTRACT: A pulsed tracer gas technique is applied to measure distributions of local mean age and residual life time of air in a half-scale experimental chamber. The room airflow patterns are flow-visualized by a Helium bubble generator for three different exhaust locations. A supply slot is located at the top of a right wall, and an exhaust slot is either at bottom-left (Case 1), bottom-right (Case 2), or top-left (Case 3) location. Results show that the distributions of LMA and LMR are different from each other, but both of them are closely related to the airflow pattern in the space. Results on overall room ventilation effectiveness are provided depending upon ventilation airflow rates for three different supply-exhaust configurations.

Key words: Ventilation effectiveness(환기효율), Local mean age(국소평균연령), Local mean residual-life-time(국소평균잔여체류시간), Pulsed tracer method(펄스법)

기 호 설 명

ACH : 공기교환율
 C : 추적가스 농도 [ppm]
 LMA_p : 국소평균연령 [sec]
 $\langle LMA \rangle$: 실평균연령 [sec]
 LMR_p : 국소평균잔여체류시간 [sec]
 $\langle LMR \rangle$: 실평균잔여체류시간 [sec]
 Q : 급기풍량 [m^3/s]

V : 실체적 [m^3]
 t : 시간 [sec]

그리스문자

$\langle \epsilon \rangle$: 실평균환기효율
 τ_n : 명목시간상수 (= V/Q)

하첨자

ex : 배기구
 sup : 급기구
 P : 실내 측정위치

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4687; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: hhan@kmu.kookmin.ac.kr

1. 서 론

주어진 환기량에 대하여 효과적으로 실내 재실 공간에 신선외기를 공급하거나 실내에서 발생하는 여러 가지 오염물질을 제거하기 위해서는 환기효율의 개념이 필요하다. 1937년 Yaglou and Witheridge⁽¹⁾에 의하여 처음으로 실내 평균 오염 농도에 대한 배기구에서의 농도의 비로서 환기효율(Ventilation effectiveness)이라는 용어가 정의 되어졌으며 현재에는 Sandberg⁽²⁾가 제안한 공기의 연령(Age) 개념에 근거한 것이 일반적인 환기효율의 개념으로 받아들여지고 있다. 급기된 공기가 실내의 임의의 위치까지 도달하는 데 걸린 시간을 나타내는 연령의 개념은 급기효율(Supply effectiveness)을 나타내는 것으로 실내에서 발생한 오염물질을 배기구로 배출시키는 배기효율(Exhaust effectiveness)을 나타내는데는 적합하지 못하다. 그러나 기존의 연구에서는 신선외기의 분배능력을 나타내는 급기효율에 대해서 측정방법⁽³⁾과 수치해석에 관한 연구⁽⁴⁾가 많이 수행되고 있으나 실내에서 발생하는 오염물질을 배출하는 능력을 정량적으로 나타낼 수 있는 배기효율에 대해서는 실험적 측정방법에 관한 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 배기구의 위치를 변화시킬 수 있는 단순화된 축소모델을 제작하여 배기효율의 측정기법을 제시하고 배기구 위치의 변화에 따른 국소평균잔여체류시간과 국소평균연령의 분포를 비교한다. 또한 다양한 환기량의 변화가 실평균환기효율에 미치는 영향에 대해 실험적으로 알아보고자 한다. 이를 위해 추적가스 주입방법 중 펄스법을 이용하여 시간에 따른 농도변화를 측정함으로써 국소평균연령, 국소평균잔여체류시간 및 실평균환기효율을 구하고 유체유동가시화에 의한 실내 기류상태와 비교하여 보고자 한다.

2. 이 론

실내 임의의 점에서의 환기효율을 나타내는 국소급기지수(Local supply index, α_p)와 국소배기 지수(Local exhaust index, ϵ_p)는 완전혼합(Complete mixing)의 실내 유동형태를 기준으로 하여 그 점에서의 국소평균연령, 국소평균잔여체류시간과 명목시간상수의 비로서 정의된다. 명목시간

상수는 실내 체적을 환기량으로 나눈 값이며 이는 시간당 전체 실내 공기가 교환되는 횟수를 나타내는 공기교환율(ACH)의 역수이다. 명목시간상수에 비하여 국소평균잔여체류시간이 길면 그 점의 국소배기효율은 낮다고 말할 수 있다. 국소급기효율도 마찬가지로 임의의 점에서의 국소평균연령이 명목시간상수보다 길면 국소급기효율이 낮다고 말할 수 있다. 급기구에서의 국소평균잔여체류시간은 급기구에서 발생한 오염물질이 배기구로 빠져나가는 데 소요되는 시간을 의미하며 급기구를 떠난 급기가 배기구까지 도달하는 시간, 즉 배기구에서의 국소평균연령과 동일한 것이며 이것은 이론상 명목시간상수(τ_n)와 같다.

$$\tau_n = LMA_{ex} = LMR_{sup} \quad (1)$$

전체 실내 공간에 대하여 국소배기효율을 평균한 값을 실평균배기효율(Room mean exhaust effectiveness)이라고 정의할 수 있으며 이것은 국소급기효율을 전체 실내 공간에 대하여 평균한 실평균급기효율(Room mean supply effectiveness, air change effectiveness)과 동일하다는 것을 이론적으로 증명하고 있다.⁽⁵⁾ 따라서 실평균급기효율과 실평균배기효율을 구분하여 사용할 필요없이 실평균환기효율(Room mean ventilation effectiveness)이라고 정의한다. 완전혼합의 경우 50%, 변위환기의 경우 100%의 실평균환기효율값을 갖는다.⁽²⁾

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{\tau_n}{2 \cdot \langle LMR \rangle} = \frac{\tau_n}{2 \cdot \langle LMA \rangle} \quad (2)$$

여기서 $\langle \rangle$ 는 전체 실내 공간에 대한 평균값을 의미한다.

실험적으로 평균연령을 구하기 위해서는 추적 가스를 급기구에서 주입하고 실내의 임의의 점에서의 농도변화를 관찰한다. 평균잔여체류시간은 추적가스를 실내의 임의의 점에서 주입하고 배기구에서의 농도변화를 관찰한다. 펄스방법을 이용하는 경우 임의의 점 P에서의 국소평균연령은 식(3)과 같이 표현되고 국소평균잔여체류시간은 식(4)와 같이 표현된다. 실내 전체 공간에서의 실평균연령 또는 실평균잔여체류시간은 식(5)와 같이 표현된다.

$$LMA_P = \frac{\int_0^\infty t \cdot C_P^{sup}(t) dt}{\int_0^\infty C_P^{sup}(t) dt} \quad (3)$$

$$LMR_P = \frac{\int_0^\infty t \cdot C_{ex}^P(t) dt}{\int_0^\infty C_{ex}^P(t) dt} \quad (4)$$

$$\langle LMA \rangle = \langle LMR \rangle = \frac{\int_0^\infty t^2 \cdot C_{ex}^{sup}(t) dt}{\int_0^\infty C_{ex}^{sup}(t) dt} \quad (5)$$

여기서 상첨자는 추적가스 주입위치를 하첨자는 추적가스 측정위치를 나타낸다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험에 사용된 챔버는 가로 1.8 m, 세로 1.2 m, 폭 0.9 m로서 우측상단부에 폭 0.825 m, 높이 0.025 m의 슬릿형 급기구가 설치되어 있고, 좌측 하단부(Case 1), 우측 하단부(Case 2)와 좌측 상단부(Case 3)에 슬릿형의 배기구가 설치되어 있다. 급기팬을 통해 급기되는 공기는 유량측정을 위한 노즐을 지나 폴리넵에 저장되었다가 급기구를 통해 챔버 안으로 급기되도록 하였다. 추적가스가 혼합되어 있는 배기는 실험실 내로 재순환

되지 않도록 실외로 배출시켰다. 챔버 내 공기의 누설이나 외부공기의 침투를 막기 위하여 챔버의 모든 모서리는 밀폐하였다. 배기팬을 조절하여 챔버 내외의 압력을 평형에 도달하도록 유지함으로써 틈새를 통한 누설을 최소화하였다. 챔버의 전체적인 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다.

급기풍량은 송풍기의 회전수를 조절하여 제어하며, 급기덕트 내에 있는 노즐 전후의 압력차를 마이크로 마노미터를 사용하여 측정함으로써 챔버에 공급되는 풍량을 측정하였다. 노즐은 KS규격의 ISA1932를 사용하였으며 노즐의 지름은 19 mm와 49 mm 두 개를 사용하였다. 관의 지름은 100 mm로 조임지름비는 각각 0.19, 0.49이고, 노즐의 유량계수는 0.99로 계산하였다.

추적가스로는 SF₆ 가스를 사용하였으며 추적가스 농도측정기는 적외선 흡수법(NDIR)에 의한 멀티가스모니터를 사용하였다. 실험 전 추적가스 농도측정기에 대한 보정을 수행하였다. 측정기의 반응시간은 약 35~45초 정도로서 측정간격을 1 분으로 하였다.

추적가스를 실내의 임의의 위치에서 방출하기 위하여 챔버 내에 추적가스 방출장치를 설치하였다. 실내에 주입되는 추적가스는 기류속도에 영향을 미치지 않아야 하므로 이에 따라 추적가스 농도측정기의 흡입량 15 cc/sec를 기준으로 하여 방출장치를 설계하였다. 또한 SF₆ 가스의 밀도차에 의한 영향을 줄이기 위하여 질소가스로 희석한 SF₆ 가스를 사용하여 방출장치의 연결부에 주

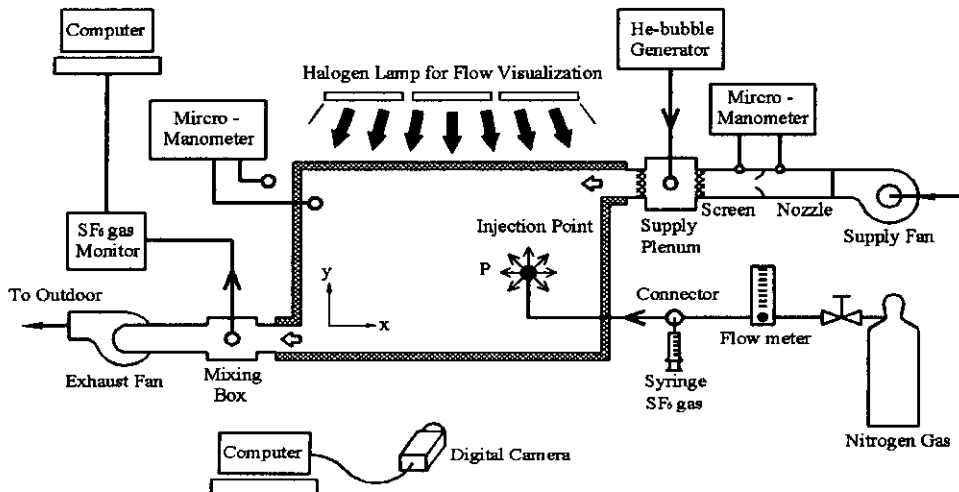


Fig. 1 Schematic of the experimental setup.

사하였으며 관내에 남아 있는 추적가스를 제거하기 위하여 수초간 질소가스를 추가적으로 주입하였다. 따라서 밀도차에 의한 영향은 고려하지 않았다.

3.2 실험방법

유동장 가시화를 위하여 헬륨-기포발생기에서 발생한 기포를 급기구에 주입시켰으며 챔버의 중앙단면을 따라 평면광을 조사하여 챔버 내의 유동장을 가시화하였다.

국소평균잔여체류시간의 분포를 측정하기 위하여 환기량을 12 ACH로 고정시키고 실내의 15개 점에서 각각 추적가스를 방출하여 배기구에서 시간에 따른 농도변화를 측정하였다. 먼저 챔버 내부의 15개의 방출점 중 측정하고자 하는 위치에 추적가스 방출장치를 고정시키고 챔버를 밀폐시킨 뒤 배기되어 빠져나가는 공기를 혼합하기 위한 혼합장치를 제작하여 장착한 후 혼합장치 하단에 추적가스측정기의 흡입필터를 부착하였다. 샘플백에 포집되어 있는 30%의 SF₆ 가스 10 cc를 주사기로 채취하여 추적가스 방출장치의 연결부에 주사하여 배기구에서의 농도변화를 측정하였다. 국소평균연령의 측정은 국소평균잔여체류시간의 측정실험과 모든 조건은 동일하나 100%의 SF₆ 가스를 급기구에 주사하여 실내 임의의 점에서의 농도변화를 측정하였다. 국소평균연령과 국소평균잔여체류시간의 측정은 2차원 유동조건으로 가정하여 챔버 내 정중앙의 수직 사각단면을 대상으로 측정하였다. 추적가스의 측정점과 방출점은 Fig. 2에 나타나 있다.

환기량의 변화에 따른 실험평균배기효율의 변화를 측정하기 위하여 여러 가지 환기량에 대하여 배기구에서의 농도변화를 반복 측정하였다. 추적

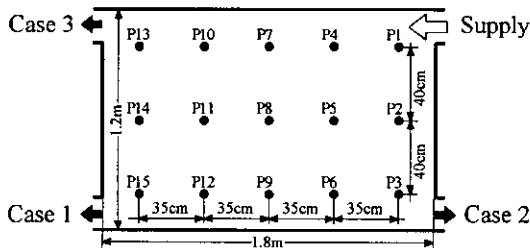


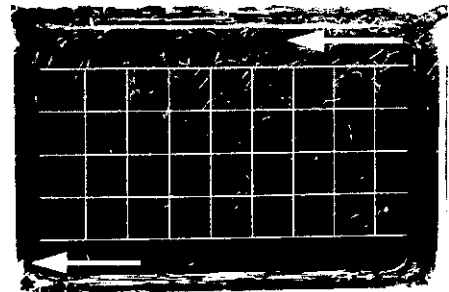
Fig. 2 Injection and monitoring points for LMA and LMR measurements.

가스측정기의 흡입필터는 국소평균잔여체류시간 측정실험 때와 동일하게 위치시키고 추적가스의 방출장치를 급기슬릿 정중앙에 위치시켰다. 환기량은 4 ACH에서 76 ACH까지 변화시키며 실험하였다.

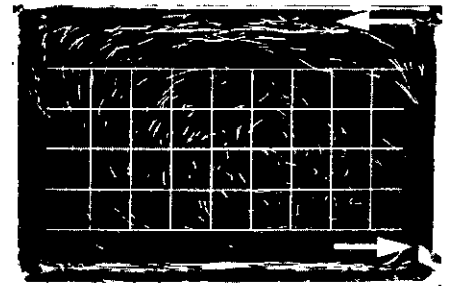
4. 결과 및 고찰

4.1 유동가시화

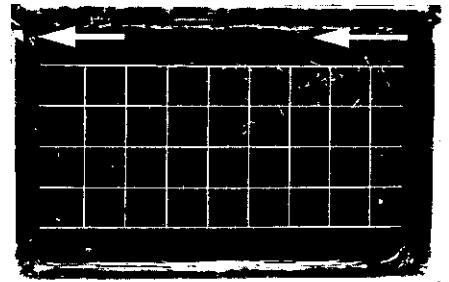
Fig. 3은 대표 환기량인 12 ACH에서의 배기구 위치의 위치에 따른 챔버 내 기류상태를 가시화하여



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 3 Flow visualization results for three difference cases.

촬영한 사진이다. Fig. 3(a)의 좌하단 배기구 조건의 경우 슬릿에서 급기되는 기류는 일정거리에도달한 후 좌하단 배기구를 향해 대각선으로 빠져나가고 양쪽 모서리에 와류유동영역이 발생하는 것을 볼 수 있다. (b)의 우하단 배기구 조건의 경우 급기되는 기류는 벽면을 따라 배기구로 빠져나가는 것을 볼 수가 있으며 챔버 중앙에 큰 와류 유동영역이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 조건에서는 실내 유동형태가 거의 완전혼합에 가까운 것을 볼 수 있다. (c)의 좌상단 배기구 조건의 경우 급기되는 공기는 일정거리를 지나 직선으로 배기되어지는 기류와 챔버의 중앙부위에 큰 와류유동영역을 발생하는 영역으로 나누어지는 것을 볼 수 있다.

4.2 국소평균연령과 국소평균잔여체류시간의 분포

펄스법에 의해 국소평균연령을 측정하기 위해서 급기구에서의 추적가스 주입에 따른 실내 각 점에서의 농도변화를 측정하였다. 대표적으로 좌상단 배기조건(Case 3)의 경우의 측정결과가 Fig. 4에 나타나 있다.

여기에는 15개점 중 대표적인 4개점에 대한 농도변화곡선만을 나타내었다. 전체적으로 추적가스 주입 초기에 급격하게 농도가 상승한 뒤 점차적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 실내 중앙 와류유동영역에 위치한 P8점은 추적가스 주입 후 농도의 상승이 지연되어 나타난 후 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 좌하단 배기조건(Case 1)의 경우 국소평균잔여체류시간을 측정하기 위

하여 펄스법에 의한 실내 각 점에서의 추적가스 주입에 따른 배기구에서의 농도변화를 측정한 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 급기효율 측정과 마찬가지로 농도 주입 초기에는 농도의 상승을 나타낸 후 시간이 지날수록 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 3의 (a)의 그림에서 볼 수 있듯이 기류가 배기구를 향해 빠져나가는 경로에 위치한 P7점은 농도상승 후 가파른 농도감소를 볼 수 있으며 와류유동영역에 위치한 P1점과 P13점의 농도변화곡선은 P7점에 비하여 완만한 감소를 보이고 있다.

이렇게 측정된 시간의 변화에 따른 농도변화곡선으로부터 식(3)과 (4)를 이용하여 모든 조건에 대한 실내의 국소평균연령과 국소평균잔여체류시간의 분포를 계산하였다. 좌하단 배기조건(Case 1)의 국소평균연령과 국소평균잔여체류시간의 분포가 Fig. 6에 나타나 있다. 두 개의 분포 모두 Fig. 3(a)에서 보여진 유동가시화 사진과 매우 유사한 형태를 나타내고 있으며 와류유동영역에서는 매우 큰 값을 나타내고 있는 것으로 보아 실내 기류분포와 매우 밀접한 관련이 있는 것을 알 수 있다.

그러나 국소평균연령의 분포의 경우 급기구 근처에서는 매우 작은 값을 배기구 근처에서는 큰 값을 나타내고 있는 반면 국소평균잔여체류시간의 분포는 배기구 근처에서는 작은 값을 급기구 근처에서는 큰 값을 나타내어 좋은 대비를 보이고 있다.

우하단 배기조건(Case 2)의 국소평균연령과 국소평균잔여체류시간의 분포가 Fig. 7에 나타나 있다. Fig. 3(b)의 유동가시화 사진과 유사하게

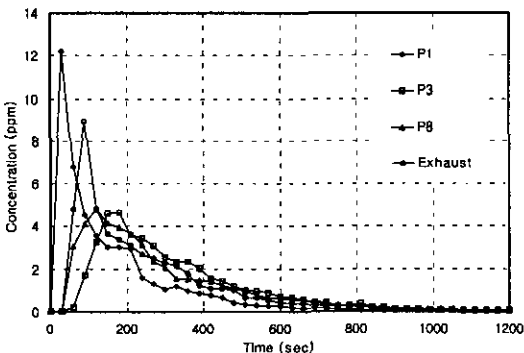


Fig. 4 Transient concentration at various measurement points for Case 3.

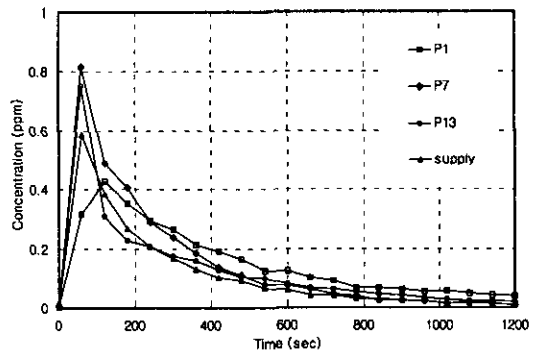


Fig. 5 Transient concentration at exhaust for Case 1.

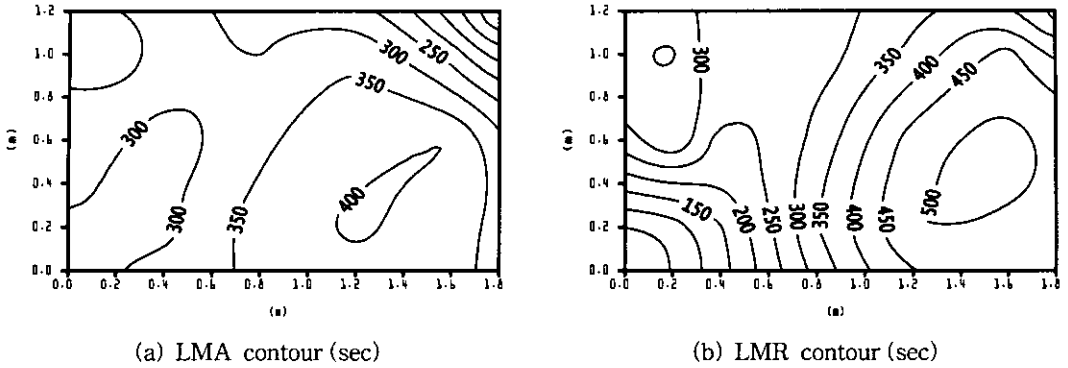


Fig. 6 LMA and LMR distribution for Case 1.

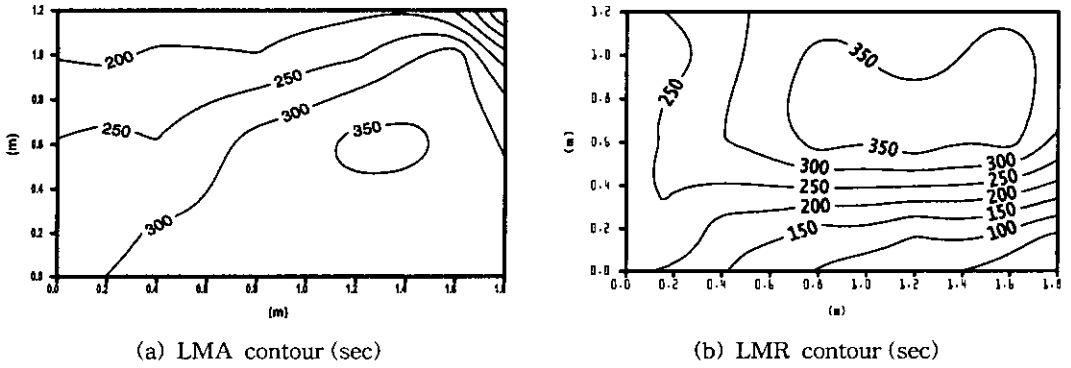


Fig. 7 LMA and LMR distribution for Case 2.

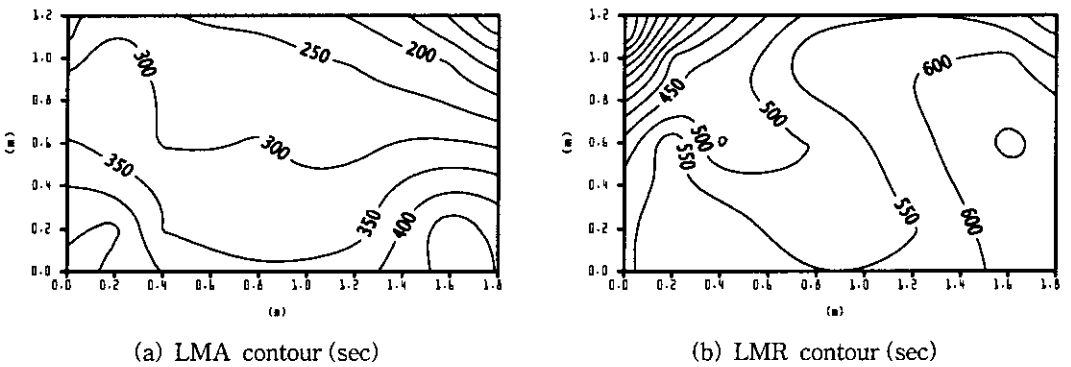


Fig. 8 LMA and LMR distribution for Case 3.

벽면을 따라 이동하는 기류영역에서는 작은 값의 국소평균연령과 국소평균잔여체류시간이 분포하고 있으며 실 중앙 부분의 와류유동영역에서는 다소 큰 값을 보이고 있다.

좌상단 배기조건(Case 3)의 국소평균연령과 국소평균잔여체류시간의 분포가 Fig. 8에 나타나 있

다. 챔버 하단부분의 국소평균잔여체류시간의 분포가 매우 큰 값을 보이고 있다. 이는 챔버 하단 부분에서 발생한 오염물질이 배기되어지지 못하고 실내 와류유동영역에 의해 실내에서 순환되어지는 것으로 생각된다. 이 경우도 역시 Fig. 3(c)의 유동가시화 사진과 밀접한 관계를 보이고 있다.

4.3 배기구의 위치에 따른 실평균환기효율

모든 조건에서 환기량의 변화에 따라 실평균환기효율을 계산하기 위하여 4, 6, 8, 10, 12, 15, 19, 23, 27, 31, 34, 38, 48, 57, 67, 76 ACH로 변화시키면서 급기구에서 추적가스를 주입한 후 시간에 따른 배기구에서의 농도변화를 측정하였다. 배기구에서의 농도측정값으로부터 식(5)와 (2)를 이용하여 각각의 모든 조건에서의 환기량에 대한 실평균환기효율을 계산하였으며 그 결과가 Fig. 9에 나타나 있다.

좌상단 배기조건(Case 3)의 경우 모든 환기량의 범위에 대해 좋지 않은 환기효율을 나타내고 있으며 좌하단 배기조건(Case 1)의 경우 낮은 환기량에서는 높은 환기효율을 보이고 있으나 환기량이 증가함에 따라 점차 감소하여 23 ACH 이상에서는 완전혼합과 유사한 값을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 우하단 배기조건(Case 2)의 경우 환기량의 증가에 따라 환기효율이 서서히 증가하다가 12 ACH 이상에서는 서서히 감소하여 큰 환기량에 대하여 완전혼합에 가까운 값을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

실내 기류분포에 따른 급기효율과 배기효율의 분포를 고찰하기 위하여 축소모델을 제작하여 실내의 국소평균연령과 국소평균잔여체류시간의 분포와 환기량의 변화와 배기구의 위치에 따른 실평균환기효율을 실험적으로 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 국소평균잔여체류시간과 국소평균연령의 분

포는 서로 상이한 면을 보이거나 실내 유동분포와는 서로 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다.

(2) 국소평균연령은 급기구 근처에서는 작은 값을 배기구 근처에서는 큰 값을 나타내었으며 반대로 국소평균잔여체류시간의 값은 배기구 근처에서 작은 값을 급기구 근처에서 큰 값을 나타내었다.

(3) 실평균환기효율의 측정결과 좌상단배기조건(Case 3)의 경우 거의 모든 환기량에 대하여 좋지 않은 환기효율을 나타내고 있으며 좌하단 배기조건(Case 1)과 우하단 배기조건(Case 2)의 경우 대체적으로 좋은 환기효율을 나타내고 있다.

추적가스방법 중 펄스법을 이용하여 잔여체류시간의 개념을 이용한 배기효율의 측정방법을 제시하였다. 배기효율은 실내 임의의 위치에서 발생한 오염물질의 배기성능을 정량화하는 데 이용될 수 있으며 국소적으로 오염물질이 발생하는 실내 장소에서 활용이 가능할 것으로 생각된다.

후 기

본 논문은 1999년도 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-310-003-3) 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Yaglou, C. P. and Witheridge, W. N., 1937, Ventilation Requirements, ASHVE Trans., Vol. 42, pp. 423-436.
2. Sandberg, M. and Sjöberg, M., 1983, The Use of Moments for Assessing Air Quality in Ventilated Rooms, Building and Environment, Vol. 18, No. 4, pp. 181-197.
3. ASHRAE, 1997, Measuring Air-Change Effectiveness, ANSI/ASHRAE 129-1997, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
4. Han, H., 1992, Numerical approach to calculate ventilation effectiveness, Korean J. air-conditioning and refrigeration engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 271-281.
5. Han, H., 1999, On the definition of ventilation effectiveness, The M. of the society of air-conditioning and refrigeration engineers of Korea, Vol. 28, No. 1, pp. 38-47.

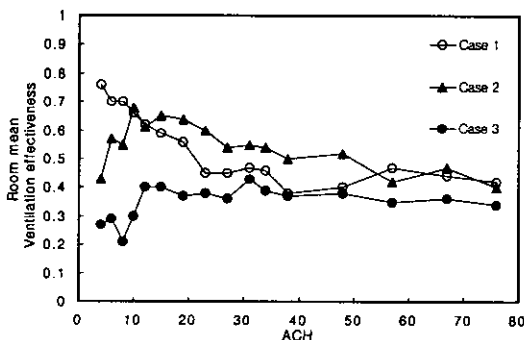


Fig. 9 Effect of ACH on room mean ventilation effectiveness.