

# 다중 급기구를 갖는 실내공간에서의 공기연령 산정방법에 관한 연구

한 화 택<sup>†</sup>, 신 철 용<sup>\*</sup>, 이 인 복<sup>\*\*</sup>, 권 경 석<sup>\*\*\*</sup>, 권 용 일<sup>\*\*\*\*</sup>

국민대학교 공과대학, <sup>\*</sup>국민대학교 대학원, <sup>\*\*</sup>서울대학교 농업생명과학대학, <sup>\*\*\*</sup>서울대학교 대학원, <sup>\*\*\*\*</sup>신흥대학

## Estimation of Local Mean Ages of Air in a Room with Multiple Inlets

Hwataik Han<sup>†</sup>, Cheolyong Shin<sup>\*</sup>, In-Bok Lee<sup>\*\*</sup>, Kyeong-Seok Kwon<sup>\*\*\*</sup>, Yong-Il Kwon<sup>\*\*\*\*</sup>

*Department of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*

<sup>\*</sup>*Graduate School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*

<sup>\*\*</sup>*Department of Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea*

<sup>\*\*\*</sup>*Graduate School of Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea*

<sup>\*\*\*\*</sup>*Department of Building Mechanical Engineering, Shingheung Collge, Euijungbu 480-701 Korea*

**ABSTRACT:** This paper considers the age of air in a ventilated space with multiple supply inlets. The local mean age of air at a point from one supply inlet is different from those from the other supply inlets. It is the purpose of the present paper to investigate theoretically the relations between the LMA's from each supply and overall combined LMA whether or not to trace the origins of supply air. Transient concentration distributions are calculated with a step-up injection of tracer gas at each supply inlet, and at both inlets simultaneously. The steady state concentration with a continuous tracer injection at a supply inlet works as a weighting factor for the corresponding LMA in calculating the average overall LMA from multiple inlets..

### 기 호 설 명

- A, B, C : 실내 관측지점
- C(t) : 시간에 따른 추적가스 농도
- Δt : 비정상상태 해석 시간 증분
- LMA : 국소평균연령
- Q : 체적 풍량
- σ : 농도확산 표준편차
- t : 시간
- t<sub>∞</sub> : 비정상상태 총 해석시간

Subsripts

- 1 : 급기구 1
- 2 : 급기구 2
- ex : 배기구
- P : 실내임의의 점 P
- sup : 급기구
- ∞ : 정상상태

### 1. 서 론

실내공간이 점차 기밀화 됨에 따라 신선한 공기를 공급하고 오염물질을 배출하는 환기의 중요성이 점차 부각되고 있다. 환기의 효율성을 정량화하기 위하여 환기효율이라는 개념이 도입되어 왔다. 환기효율의 정의는 다양한 각도에서 시도되었으나 일반적으로 Sandberg<sup>(1)</sup>가 제안한 평균연령과 실내체류시간의 개념이 널리 받아들여지고 있다. ASHREA<sup>(2)</sup>와 AIVC<sup>(3)</sup>에서 현재 사용하고 있는 공기교환효율이나 배기효율의 정의는 이러한 공기 연령의 개념에 근거하고 있다. 그러나 농도곡선의 아래면적이 아닌 농도값이나 농도의 감쇠율을 이용한 환기효율의 정의 등이 시도된 바 있다.<sup>(4)</sup> 실내 공기연령의 분포를 용이하게 계산하기 위하여 한<sup>(5)</sup>은 비정상상태의 농도해석 과정을 생략하고 균일 오염발생의 상태에서 정상상태의 농도해석을 수행하는 방법을 제시하였다. 또한 실내잔여체류시간을 해석하기 위하여

Kato<sup>(6)</sup>는 역시간법을 제안하였고 한<sup>(7)</sup>은 역유동법을 제안하였다. 두 방법의 차이는 확산항의 부호가 서로 반대이므로 확산항이 무시될 수 있는 경우에는 동일한 결과를 얻는다.

지금까지 수행된 환기효율에 관한 연구는 주로 급기구가 하나인 경우이거나 여러 개이라도 하나의 급기구로 취급할 수 있는 문제를 다루어왔다. 다수의 급기구가 존재하는 경우 각 급기구로부터 실내 임의의 지점까지 도달하는 시간은 각기 다르게 나타난다. 즉 실내 위치에 따라서 각 급기구가 미치는 영향이 달리 나타난다. 영향을 미치는 정도는 각 급기구로부터의 상대적인 거리와 상대적인 풍량 등에 의존한다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 각 급기구로부터의 도달시간과 실내공간의 국소평균공기연령과의 관계를 수식화하고 이들 간의 관계를 수치해석으로 검증함으로써 공기연령에 관한 환기 이론을 다수의 급기구가 존재하는 경우까지 확장하고자 한다. 이러한 방법론은 다수의 급기구가 존재하는 경우, 급기구들을 적절하게 배치하고 알맞은 풍량을 설계하는데 기초적인 자료로 활용될 수 있을 뿐 아니라 각 급기구에 의한 실내공간에 미치는 환기 기여율을 산정하는데 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 이론적 배경

공기연령이란 실내로 도입된 공기가 임의의 지점까지 도달하는데 걸린 시간을 말한다. 이 때 여러 경로를 통하여 도달할 수 있기 때문에 이를 평균한 값을 국소평균 공기연령(local mean age)이라고 한다. 국소평균공기연령은 도입된 신선외기가 실내 공간에 얼마나 빨리 도달하는지를 나타낸다.

급기구가 여럿 있는 경우, 각 급기구로부터의 평균연령 즉 도달시간은 서로 상이하며 전체 급기의 평균연령과도 상이하다. Fig. 1과 같이 급기구 1, 2를 통하여  $Q_1$ 와  $Q_2$ 의 풍량이 공급되며 배기구는 한 개 있는 경우를 생각한다. 여기서 실 전체의 환기량은 각 풍량의 합과 같다.

$$Q_{ex} = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

급기구 1에서 체송방법에 의해 추적가스를 발생시키면 P점에서의 농도반응은 Fig. 2(a)와 같이

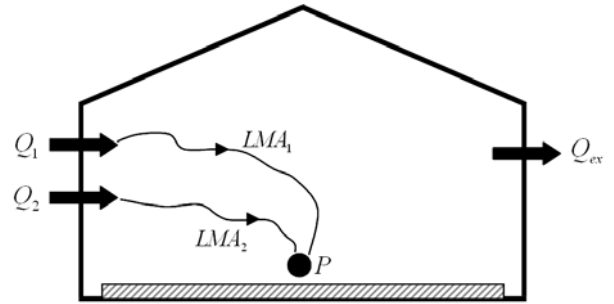


Fig. 1 Local mean ages from each supply inlet.

나타난다. 농도반응은 시간이 약간 지연되어 나타나고 시간이 오래 지난 후에는 정상상태 농도에 도달한다. 이 때 반응이 지연된 시간의 평균값, 즉 곡선위의 면적이  $LMA_1$ 이 된다. 또 이를 중심으로 양쪽으로 분산되어 있는 정도를 확산분포  $\sigma_1$ , 그리고 정상상태에 도달했을 때 P점에서의 농도를  $C_p^1(\infty)$ 라 한다. 여기서 급기구 1로는  $C=1$ 의 추적가스가, 그리고 다른 급기구로는  $C=0$ 의 공기가 주입되므로 정상상태의 농도는 0과 1 사이의 값을 갖는다.

마찬가지로 급기구 2를 통하여 체송방법에 의하여 추적가스를 발생시켰을 때 P점의 반응은 역시  $LMA_2$ ,  $\sigma_2$ ,  $C_p^2(\infty)$ 와 같은 변수들로 특징지어진다.  $C_p^2(\infty)$ 는 이때의 정상상태 농도로서 앞의 경우와 급기구에서의 추적가스 주입 농도가 반대로 되었으므로 결과적으로  $C_p^1(\infty)$ 와는 서로 보의 관계에 있다.

급기구 1과 2에서 동시에  $C=1$ 의 추적가스를 체송방법으로 발생시켰을 때 P점의 농도변화는  $C_p^1(t)$ 와  $C_p^2(t)$ 를 단순 합산한 것과 같다. 실내유동이 동일한 상태에서 농도 관련 미분방정식이 선형으로 주어지기 때문이다. 각각의 농도곡선을 합산하여 그린 것이 Fig. 3에 나타나있고 정상상태에 도달하면 실내 모든 지점에서 1.0이 된다.

$$C_p(t) = C_p^1(t) + C_p^2(t) \quad (2)$$

급기구 1과 급기구 2로부터의 각 국소평균연령과 급기 전체에 대한 국소평균연령은 Fig. 3에 주어진 바와 같이 곡선 위 면적과 같고 수식으로는 다음과 같이 구해진다.

$$LMA_1 = \int_0^{\infty} 1 - \frac{C_p^1(t)}{C_p^1(\infty)} dt \quad (3)$$

$$LMA_2 = \int_0^{\infty} 1 - \frac{C_p^2(t)}{C_p^2(\infty)} dt \quad (4)$$

$$LMA = \int_0^{\infty} (1 - C_p^1(t) - C_p^2(t)) dt \quad (5)$$

전체 급기에 의한 LMA를 계산하기 위하여 두 개의 농도곡선을 중첩하여 정리하면 식(6)과 같이 구해진다.

$$LMA = C_p^1(\infty) \cdot LMA_1 + C_p^2(\infty) \cdot LMA_2 \quad (6)$$

즉 전체 급기에 의한 LMA는 각각의 급기구로부터의 LMA를 각 급기구로 추적가스가 주입된 정상상태 농도값으로 가중한 결과로 나타난다.

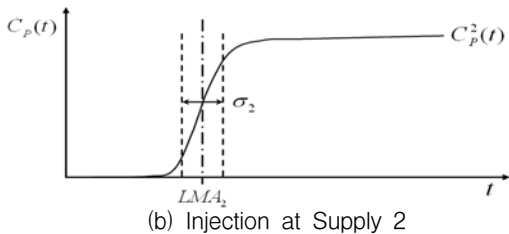
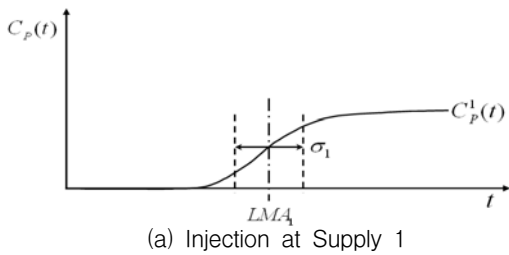


Fig. 2 Concentration responses at point P by tracer gas injection at each supply inlets.

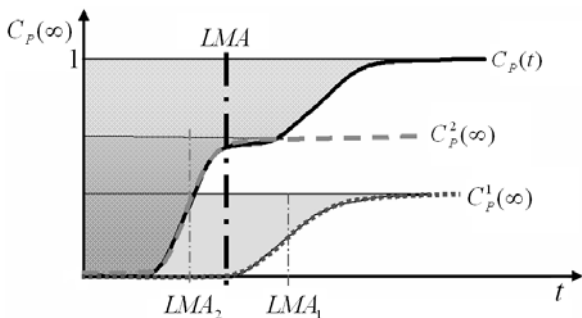


Fig. 3 Relations of LMA's and superimposed concentration profiles.

여기서 실내 임의의 점에서 각 정상상태의 농도 값  $C_p^1(t)$ 와  $C_p^2(t)$ 는 다음의 관계를 갖는다.

$$C_p^1(\infty) + C_p^2(\infty) = 1 \quad (7)$$

### 3. 수치해석

#### 3.1 해석모델

본 연구의 목적은 정확한 기류 시뮬레이션에 있는 것이 아니라 국소평균연령과 급기구의 관계를 이론적으로 파악하고자 하는 것이므로 다소 단순화된 해석모델을 설정하였다. 해석모델은 Fig. 4와 같이 가로, 세로가 4m × 2m인 이차원 직사각형으로 0.2m 크기의 2개의 급기구와 1개의 배기구가 있는 모델이다. 급기구 1은 좌측하단에 위치하고 급기구 2는 상단우측에 위치하도록 하였다. 농도변화를 관측하기 위하여 해석영역의 중심선을 따라 0.5m 간격으로 A, B, C 세 지점을 선정하였다. 유동은 각각의 급기구에서 동시에 동일한 풍량이 급기 되도록 하였다. 이때의 전체 환기량에 대한 명목시간상수는 20초이다.

#### 3.2 해석방법

농도계산에 앞서 실내의 기류분포를 정상상태로 해석하였다. 각 급기구의 입구 속도조건은 1m/s로 설정하였고 배기구에서 출구조건은 대기압에서 토출되는 압력 경계조건을 적용하였다. 난류모델은 표준 k-ε모델을 사용하였으며, 해석을 단순화하기 위하여 밀도를 비롯한 유체의 물성치는 모두 일정하다고 가정하였다. 여기서 상세한 전산유체역학적 이론 설명은 생략한다.

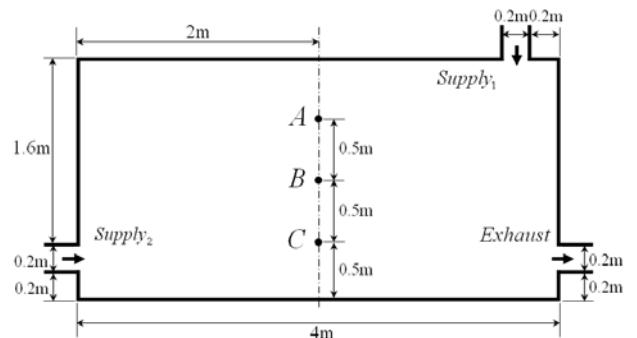


Fig. 4 Schematic of calculation model with two supply inlets and one exhaust.

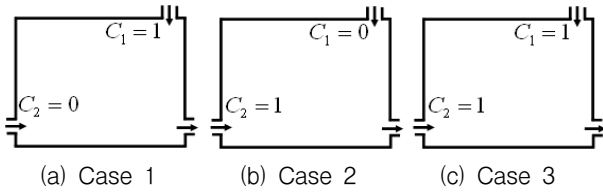


Fig. 5 Concentration conditions given at inlets.

계산된 기류분포를 이용하여 각 급기구 별로 추적가스를 체승방법으로 주입하고 정상상태에 도달할 때까지 농도분포를 비정상상태로 해석을 수행하였다. 추적가스의 주입조건은 Fig. 5와 같이 급기구 1에서만 추적가스를 주입하는 경우 (Case 1), 급기구 2에서만 추적가스를 주입하는 경우(Case 2), 급기구 모두에서 추적가스를 주입하는 경우(Case 3)를 고려하였다. 추적가스가 주입되지 않는 급기구로는 신선외기가 들어오는 것으로 생각하였다. 따라서 추적가스의 농도를 급기구에서 주입농도를 1로, 외기농도를 0으로 무차원화하여 표현하였다. 해석은 상용 CFD코드인 Fluent 6.3을 사용하였다.

#### 4. 수치해석 결과

##### 4.1 정상상태 기류해석

정상상태에서 기류분포 해석 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 두 방향에서 급기가 됨으로 인해 두 개의 와류가 생성된다. 배기구에서 상대적으로 거리가 먼 급기구 2의 영향으로 좌측상단에 큰 와류가 생성되고 급기구 1과 큰 와류사이에서 작은 와류가 생성된다.

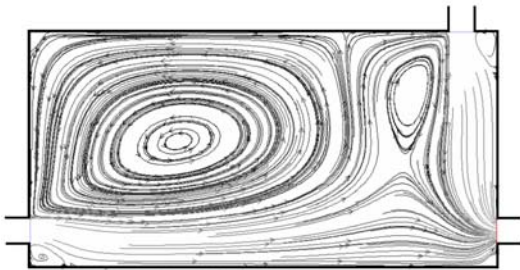
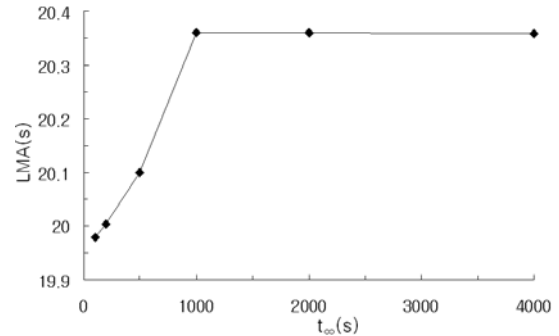


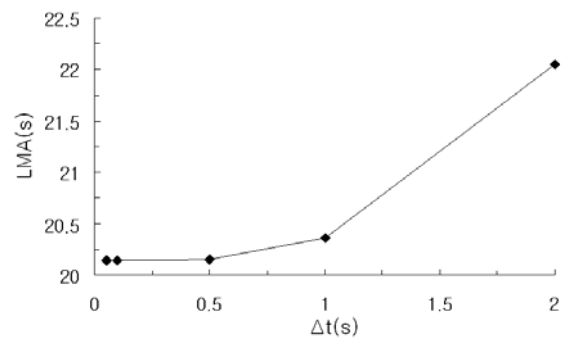
Fig. 6 Steady state streamline pattern.

##### 4.2 비정상상태 농도해석

비정상상태의 해석에 사용된 시간증분( $\Delta t$ )과 정상상태 도달시까지의 총 해석시간( $t_{\infty}$ )이 결과값에 영향을 미칠 수 있다. 시간증분과 총 해석시간에 의한 영향을 파악하기 위하여 Case 3의



(a) Total analysis time



(b) Transient time increment

Fig. 7 Effects of total time and time increment for transient analysis.

출구 LMA를 비교하였다. 이 때 이론적인 출구 LMA는 20s이다. 시간 증분을 1초로 하고 총 해석시간을 변화시킨 결과가 Fig. 7(a)에 나타나 있다. 해석시간이 1000초 이상에서는 결과의 변화가 거의 없다. 또 시간증분을 변화시키며 수행한 결과가 Fig. 7(b)에 나타나 있다. 시간간격이 0.5초 이하에서는 일정한 값에 수렴하고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 이후 해석에서는 해석시간을 1000초, 시간간격을 0.5초로 하여 수행하였다.

비정상상태의 농도분포 해석결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 시간경과에 따라 급기구로 주입된 추적가스가 실내 공간으로 확산되는 과정을 볼 수 있다. 정상상태에 도달하면 Case 1과 Case 2의 농도분포는 서로 보의 동일한 양상을 보인다.

각 지점에서 LMA를 정량적으로 구하기 위하여 시간경과에 따른 농도변화를 Fig. 9에 도시하였다. Case 1의 경우 A, B, C점에서 상당히 낮은 농도를 보이는데 이는 급기구에서 주입된 추적가스가 실내 지점으로 충분히 공급 또는 확산되지 못하고 그대로 배기구로 빠져나가기 때문이다. 여기서 급기구 풍량이 동일하기 때문에 출구 농도는 0.5의 값을 갖는다.

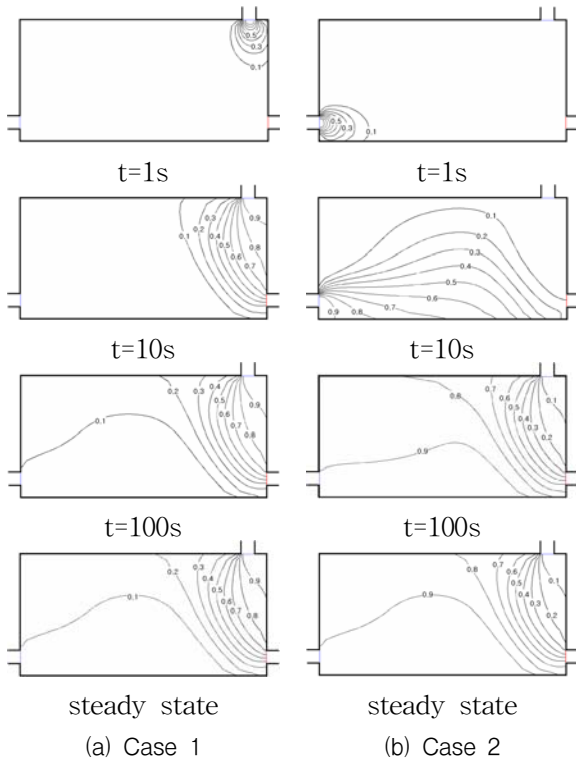


Fig. 8 Transient concentration distributions.

Case 2에서는 Case 1과 마찬가지로 배기구 농도는 0.5에서 정상상태를 이루지만 관측지점에서의 농도는 상대적으로 높게 나타난다. 급기구 2에서 유입된 공기는 관측지점을 거쳐서 배기구로 빠져나가기 때문이다. Case 3에서는 정상상태에 도달하면 실내 모든 점에서 농도가 1.0에 도달한다. Case 2와 Case 3에서 농도증가율이 잠시 둔화되었다가 다시 증가하는 구간이 생기는데 이는 실내 와류의 영향으로 판단된다. Table 1은 각 Case별로 공기연령과 정상상태 농도값을 보인다. 각 지점에서 LMA<sub>1</sub>과 LMA<sub>2</sub>를 정상상태 농도로 가중평균한 LMA<sub>1+2</sub> 값이 Case 3의 LMA<sub>3</sub>와 동일한 것을 확인할 수 있다. 마지막 자리가 상이한 것은 계산과정에서 유효숫자의 처리 때문에 발생한 것이다.

Fig. 10은 실내 각 지점에서 비정상상태의 농도 곡선을 적분하여 계산된 LMA값을 각 Case별로 실내의 분포 형태로 나타낸 것이다. 예상되는 바와 같이 Case 1의 경우에는 급기구 1 주위에서, Case 2의 경우에는 급기구 2 주위에서 LMA가 작은 값을 갖고 재순환영역에서 큰 값을 갖는 것을 볼 수 있다. Case 3의 경우에는 Case 1과 Case 2의 중간 정도의 값을 갖는다.

LMA의 분포를 실내공간 전체에 대하여 평균된 각 급기에 의한 실평균연령은 Case 1이 30.9초, Case 2가 27.7초, Case 3이 25.4초이다. Case 2의 실평균연령이 Case 1보다 작은 것은 급기구 2의 실내 공기연령 분포에 대한 기여율이 높다는 것을 의미한다. Case 3은 두 개의 급기구에 의한 것이므로 Case 1, 2 보다 작게 나온다.

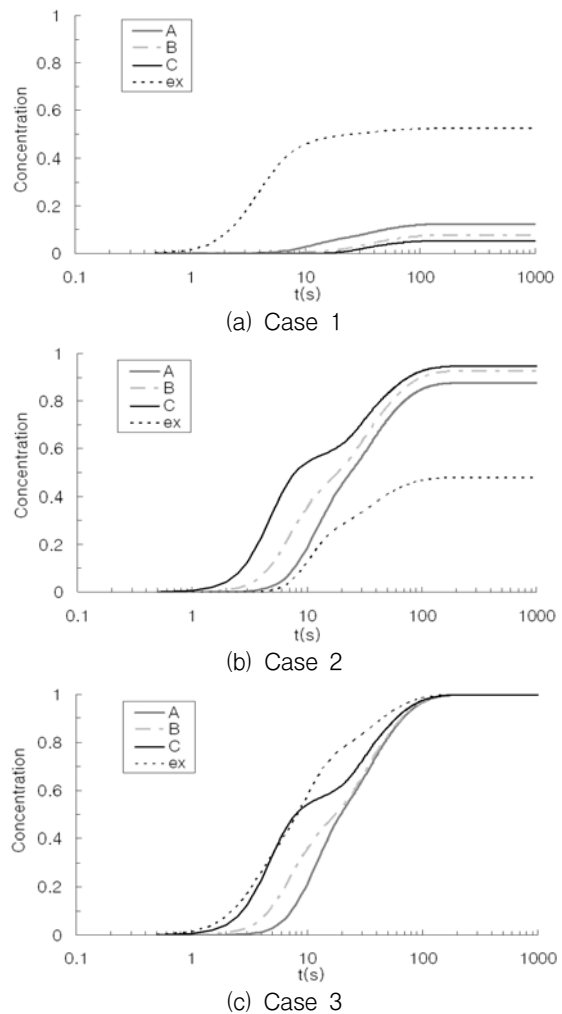


Fig. 9 Concentration variations at the points of interest for three cases.

Table 1. LMA calculation results.

Point	$C_{1,\infty}$	LMA <sub>1</sub>	$C_{2,\infty}$	LMA <sub>2</sub>	LMA <sub>1+2</sub>	LMA <sub>3</sub>
A	0.13	30.66	0.88	29.86	30.01	29.96
B	0.08	42.23	0.92	26.52	27.76	27.71
C	0.06	45.97	0.95	20.75	22.16	22.12
ex	0.52	8.61	0.48	32.75	20.19	20.15

## 참고문헌

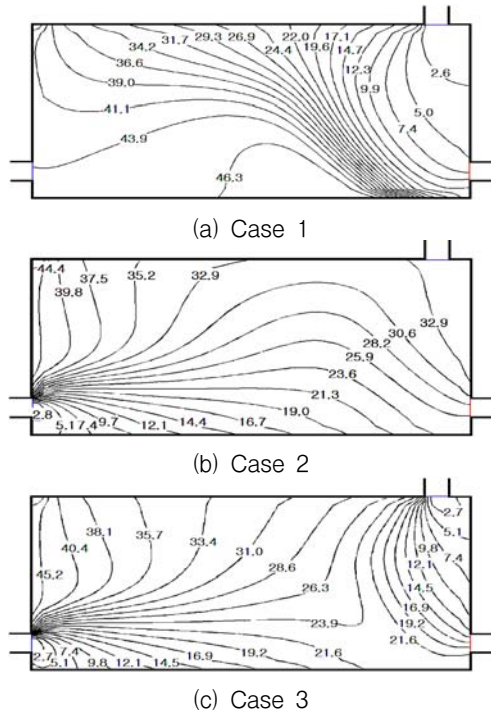


Fig. 10 Distributions of LMA for three different cases.

## 5. 결론

급기구가 두 개인 경우에 각 급기구로부터 실내 지점까지의 도달시간과 국소평균연령의 관계를 산정하는 방법을 이론적으로 고찰하였고 그 결과를 수치해석적으로 검증하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 급기구가 두 개인 경우 각 급기구에 의한 정상상태 농도 분포는 서로 보의 관계를 보인다.

(2) 전체급기에 의한 LMA는 각 급기구로부터의 LMA에 각 급기구의 정상상태 농도를 가중하여 평균한 값과 같다.

(3) 각 급기구에 의한 정상상태 농도분포는 실내로 공급되는 전체 급기에 대한 각 급기구의 기여율을 나타내는 것으로 이해할 수 있다.

향후 급기구에 대한 공기연령 뿐만 아니라 배기구가 여럿 존재하는 경우에 대한 잔여체류시간 등 환기효율 및 배기효율에 관한 연구가 지속적으로 수행될 예정이다.

## 후 기

본 연구는 학술진흥재단 2008년도 기초연구 과제(기초과학분야) 지원으로 수행되었습니다.

1. Sandberg, M., 1981, What is ventilation efficiency, Building and Environment, Vol. 16, No. 2, pp. 123-135.
2. ASHREA, 1997, ASHREA Handbook Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineering.
3. AIVC, A Guide to Air Change Efficiency, Technical Note AIVC28, Air Infiltration and Ventilation Centre.
4. Liang, H., 1994, Room Air Movement and Contaminant Transport, Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, University Minnesota.
5. Han, H., 1992, Numerical Analysis of Ventilation Effectiveness using Turbulent Airflow Modeling, J. of SAREK, Vol. 4, No. 4, pp. 253-262.
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, University of Tokyo, July 22-24.
7. Han, H., 1995, A Study of Numerical Procedure to Evaluate Ventilation Effectiveness using Inverse-Flow Calculation Method, Proceedings of KSME '95 Autumn Annual Conference(II), pp. 664-669.
8. Han, H., 1999, On the Definition of Ventilation Effectiveness, Magazine of SAREAK, Vol. 28, No. 1, pp. 38-47.
9. Jang, K., 1999, A Study on Measurement Techniques of Supply and Exhaust Effectiveness utilizing Tracer gas, Ph.D. thesis, Kookmin University, Seoul, Korea.
10. ASHRAE, 2004, Standard 62-2004 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, ASHRAE, Atlanta, Georgia.