

# 환기량 변화에 따른 실내공기질과 국소급기지수 특성

한 창 우, 노 광 철, 오 명 도<sup>†\*</sup>

서울시립대학교 기계정보공학과 대학원, \*서울시립대학교 기계정보공학과

## Characteristics of Indoor Air Quality and Local Supply Index with a Variation of Supply · Exhaust Airflow rate

Chang-Woo Han, Kwang-Chul Noh, Myung-Do Oh<sup>†\*</sup>

Graduate school of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

\*Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

**ABSTRACT:** We performed the numerical analysis on the characteristics of indoor air quality and local supply index with a variation of supply · exhaust airflow rate. We analyzed the local supply index and carbon dioxide concentration at the room and breathing zone with respect to the variation of the supply · exhaust airflow rate. From the numerical results, we found that local supply index was affected but carbon dioxide concentration was hardly affected by the variation of the airflow rate in the room. And we also knew that carbon dioxide concentration was raised in despite of the increment of the supply airflow rate in the breathing zone. After this study it is necessary to analyze the local exhaust index when we evaluate the state of the ventilation in the room.

**Key words:** Local supply index(국소급기지수), Carbon dioxide concentration(이산화탄소 농도), Variation of airflow rate(환기량 변화), Breathing zone(호흡선 영역)

### 기 호 설 명

- C : 이산화탄소 농도 [ppm]
- LEI : 국소급기지수
- LMA: 국소평균공기연령 [second]

### 그리스 문자

- a : 국소급기지수
- $\tau_n$  : 명목시간상수

### 1. 서 론

에너지 절약의 대책으로 실내 환기량이 감소함에 따라 밀폐된 공간에서 발생한 오염물질이 실외로 원활히 배출되지 않아 재실자의 건강을 위협하고 있다. 이에 환경부에서는 “지하생활공간 공기질 관리법”을 “다중이용시설등의 실내공기질 관리법”<sup>(1)</sup>으로 개정하는 등 국가적인 차원에서 실내 공기질 향상을 위하여 노력하고 있다.

그리고 국내 여러 연구 그룹에서는 쾌적한 실내 공기질환경을 유지하기 위하여 실내 환기와 공기질 제어에 대한 다양한 연구를 수행하고 있다. Jang. et al.<sup>(2)</sup>은 환기시스템이 설치된 대학교 강의실에서 CO<sub>2</sub> 농도와 국소평균공기연령의 연관성에 관한 실험적 · 수치적인 연구를 수행하였

<sup>†</sup> Corresponding author  
Tel.: +82-2-2210-2756; fax: +82-2-2248-5110  
E-mail address: mdoh@uos.ac.kr

고, Noh. and Oh.<sup>(3)</sup>은 4-way cassette 에어컨과 환기시스템이 설치된 초등학교 교실에서 열적 성능과 환기를 고려하여 에어컨 냉기의 최적 토출 각도를 제시하는 수치적인 연구를 수행하였다. 그리고 Kim. et al.<sup>(4)</sup>은 사무실에서 신성공기의 유인효과를 향상시키기 위하여 급기구의 최적 위치를 선정하여 실내 CO<sub>2</sub> 농도와 TVOC 농도 분포 특성을 평가하는 수치적인 연구를 수행하였고, Kwon. and Han.<sup>(5)</sup>은 멀티에어컨과 환기시스템이 설치된 초등학교 교실에서 외기도입 방식과 히트펌프의 토출각도 변화에 따라 재실영역과 실(room)에서 환기효율을 평가하는 수치적인 연구를 수행하였다.

그러나 기존에 수행된 연구의 대부분은 재실자나 오염원의 위치에 관계없이 급·배기량의 비율을 일정하게 설정하여 실내공기질이나 환기상태를 평가하였다. 따라서 본 연구에서는 환기시스템이 적용된 대학교 강의실에서 오염원의 위치를 고려하여 급·배기량 변화시켜 실내공기질과 국소급기지수의 특성을 살펴보는 연구를 수행하였다.

## 2. 연구모델

### 2.1 강의실 및 환기시스템

Fig. 1은 본 연구에 사용된 강의실의 개념도를 나타낸 것이다. 강의실의 크기는 6.6 m(W)×2.4 m(H)×11.2 m(L)이고, 체적은 177 m<sup>3</sup>이다. 급기구는 Fig. 1에서와 같이 시스템에어컨을 중심으로 대각선 방향에 4개를 설치하여 신선공기의 분

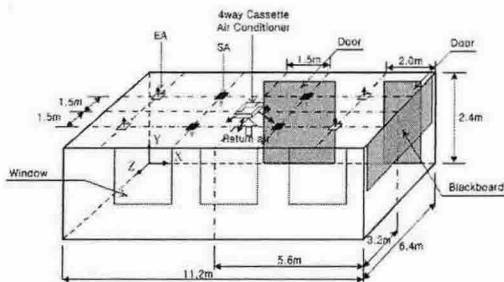


Fig. 1 Geometrical configuration of the lecture room.

배성능을 우수하게 하였고, 급기구를 통한 신선 공기 도입량은 약 1000 CMH이다. 배기구는 재실자에 의해 오염된 공기와 칠판에서 발생하는 분진을 효과적으로 배출시키기 위하여 강의실 앞쪽과 뒤쪽에 각각 2개씩 설치하였다. 대상 강의실은 1종 환기방식이 적용되어 배기량은 급기량과 동일하다.

### 2.2 재실자 및 시스템에어컨

강의실 내 재실 인원은 총 30명으로 대부분은 수강을 위하여 강의실 앞부분에 정좌해 있다. 수치해석 시 정좌상태의 재실자는 Fig. 2와 같이 모델링 하였으며, 재실자 피부의 온도는 33℃로 정하였다.<sup>(6)</sup> 또한 재실자는 시간당 0.0145 m<sup>3</sup>의 CO<sub>2</sub>를 배출한다고 모델링하였다. 강의실에는 실내 공조를 위하여 천정형 4-way 시스템에어컨이 설치되어 있다. 시스템에어컨의 냉기토출은 4방향으로 되어 있고, 최대풍량은 29 CMM으로 강의실의 폭과 길이의 비에 관계없이 균일하게 냉기가 토출된다. 본 연구에서는 토출각을 30°로 고정하였다. 이는 선행연구에서 시스템에어컨의 냉기 토출각이 30° 이상인 경우 재실자가 온열불쾌감을 느낄 수 있다고 언급했기 때문이다.<sup>(7)</sup>

## 3. 평가지표

### 3.1 국소급기지수

국소급기지수(local air supply index,  $\alpha$ ; LSI)는 국소평균공기연령에 대한 명목시간상수의 비

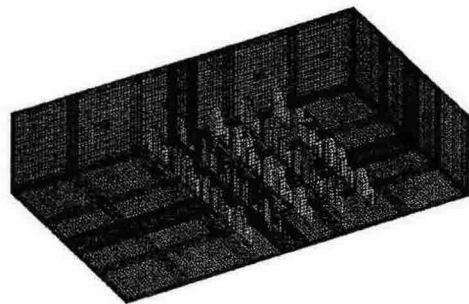


Fig. 2 Position of the occupants and mesh scheme.

율로서 정의하며, 주로 급기의 실내 분배성능을 정량화 하는데 사용된다. 국소급기지수는 식 (1) 과 같이 표현할 수 있다.<sup>(8)</sup>

$$\alpha_p = \tau_n / LMA_p \quad (1)$$

여기서 국소평균공기연령(local mean age of air, LMA)이란 신선외기가 급기구를 통하여 실내 임의의 점까지 도달하는데 걸리는 시간을 의미한다. 명목시간상수  $\tau_n$ 은 실내 공기의 완전혼합 환기상태에서 시간당 환기량에 대한 실내체적의 비율로서 나타낸다.

### 3.2 이산화탄소

CO<sub>2</sub>는 무색, 무미, 무취의 기체로 일반적으로 대기 중에 0.04% 정도 포함되어 있으며, 최근 지구온난화 가스로 주목받고 있으나 대기오염물질로 분류되지 않고 있다. 실내 CO<sub>2</sub> 농도가 0.1%

Table 1 Governing eqn. and model coefficients

Continuity equation :	
$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$	
Momentum equation :	
$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \mu + \mu_t \right) \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right\} + S_{u_i}$	
Energy equation :	
$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left( \frac{\mu}{\sigma_i} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right\} + S_T$	
Turbulent kinetic energy equation :	
$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + G_k - \rho \epsilon$	
Dissipation rate equation of Turbulent kinetic energy :	
$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right\} + G_k C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$	
Concentration equation :	
$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ u_i \left( \frac{\rho C}{S_c} \right) \right\} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{1}{\rho} \left( \frac{\mu}{\sigma_i} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\rho C}{S_c} \right) \right\} + 1$	
where,	
$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \mu_t = \frac{c_\mu \rho k^2}{\epsilon}$ ,	
$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$	
$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 0.9, \sigma_i = 1.0, \sigma_t = 1.0$	

Table 2 Boundary condition

Category	Input data
Outdoor temperature	30.0°C
Outdoor CO <sub>2</sub> concentration	440 ppm
Thermal conduction rate	Exterior wall : 0.57 W/m <sup>2</sup> °C Indoor wall : 3.49 W/m <sup>2</sup> °C Window : 3.26 W/m <sup>2</sup> °C Door : 3.18 W/m <sup>2</sup> °C Floor : 0.37 W/m <sup>2</sup> °C
Supply airflow	29 CMM
Discharge airflow	1000 CMH

또는 0.2% 이상이 되면 그 실내의 환기는 불량한 것으로 고려되고 있다. 이는 CO<sub>2</sub> 자체의 영향보다는 CO<sub>2</sub>가 증가하는 환기불량 상태가 실내에서는 체열발산에 의한 온도나 습도의 증가, 분진, 세균 등도 불량한 상태로 되는 경우가 많으므로 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 기준(한국과 일본은 1,000 ppm, 미국은 실내의 농도차가 700 ppm)으로 실내의 환기상태를 평가하는 지표로서 사용되고 있다.

### 4. 수치해석방법

강의실 내부에서 CO<sub>2</sub>의 농도와 국소급기지수를 계산하기 위하여 Table 1의 지배방정식을 이용하였고, 지배방정식의 계산에는 상용 CFD 코드인 STAR-CD를 사용하였다. 난류계산은 실내 유동해석에서 많이 사용되고 있는 표준  $k-\epsilon$  난류 모델을 사용하였다. 수렴판정 조건으로는 강의실 중앙에서의 운동량으로 정규화한 각 격자에서의 운동량 유수의 합과 연속방정식에서 유수의 합이 모두 10<sup>-3</sup>, 농도방정식에서는 10<sup>-6</sup> 이하일 때로 정하였다. 실제 계산에서는 수렴조건을 만족하기 위하여 약 5,000회의 반복 계산이 필요했다. 해석 모델인 강의실은 총 604,080개의 제어체적으로 구분되어 해석되었으며 천장, 바닥, 벽면, 에어컨 및 급·배기구 근처에서 조밀한 격자가 되도록 구성하였다. 수치해석시 사용한 경계조건은 Table 2와 같다.

본 연구에서는 오염원의 위치를 고려하여 급·배기량 비율의 변화에 따라 실내공기질과 급기효율의 특성을 살펴보기 위하여 Fig. 3에 표시된

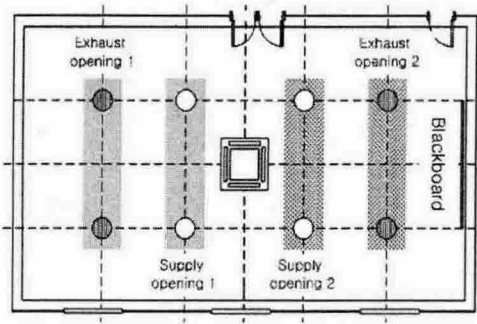


Fig. 3 Opening position of the room.

Table 3 Airflow ratio between front and rear of supply · exhaust opening.

Case No.	supply · exhaust opening 1 : supply · exhaust opening 2
1	5 : 5
2	4 : 6
3	3 : 7

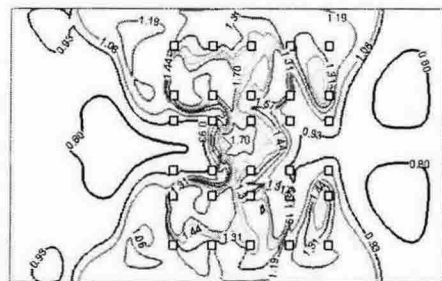
급·배기구를 그룹으로 설정하여 Table 3에서와 같이 위치에 따라 급·배기량의 비율을 조절하였다.

## 5. 결과 및 고찰

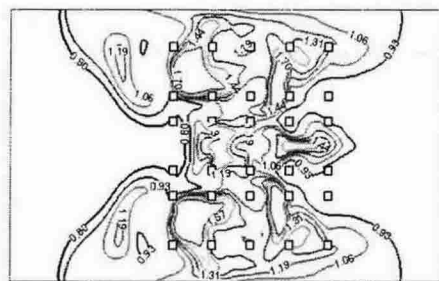
### 5.1 국소급기지수

Fig. 4는 재실자의 호흡선 높이인 1.1 m의 단면에서 급·배기량 비율의 변화에 따라 국소급기 지수의 분포를 나타낸 것이다. 강의실 앞쪽 급·배기량이 증가함에 따라 강의실 앞부분의 국소급기 지수는 높아지는 것으로 나타났다. 이로부터 강의실 앞부분에서는 신선공기의 실내 분배가 효과적으로 이루어짐을 알 수 있었다. 반면 강의실 뒷부분의 경우에는 신선공기의 실내 유입량이 감소함에 따라 국소급기 지수가 낮은 영역이 넓어져 신선공기의 급기에 문제가 있는 것으로 나타났다. Fig. 4(c)는 (b)보다 강의실 뒤쪽으로 급기량이 감소하였음에도 강의실 뒷부분에서 국소급기

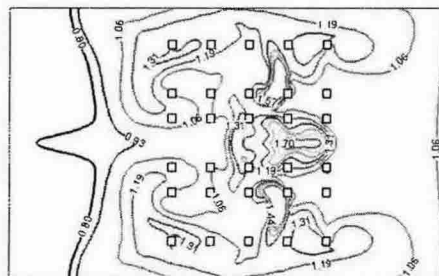
지수가 높게 나타났다. Fig. 4(b)의 경우 시스템 에어컨에서 토출되는 냉기가 급기구를 통하여 실내로 유입되는 신선공기의 유동을 방해하였기 때문에 강의실 뒷부분에서 국소급기 지수가 낮게 분포되었지만 Fig. 4(c)의 경우에는 급기량이 감소하여 저속으로 유입되는 신선공기가 시스템 에어컨에서 토출되는 빠른 기류에 유입되어 실내에 분배되었기 때문에 국소급기 지수가 높아진 것으로 나타났다.



(a) Case 1

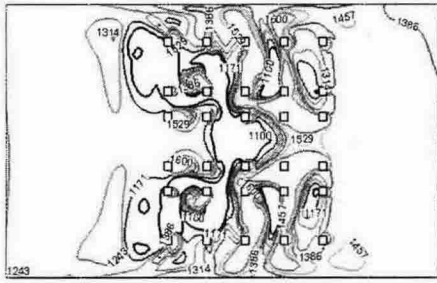


(b) Case 2

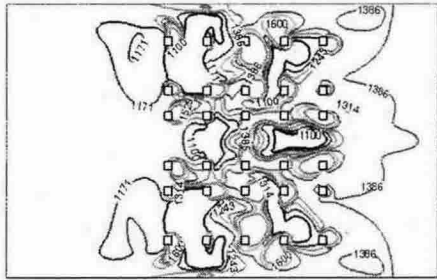


(c) Case 3

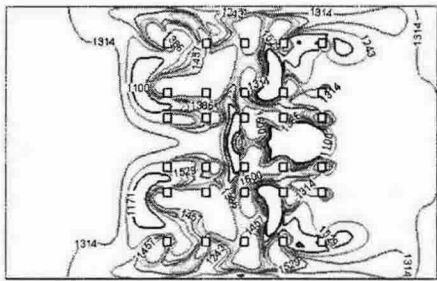
Fig. 4 Local supply index distribution of z-x plane at y=1.1 m for a variation of airflow rate.



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 5 CO<sub>2</sub> concentration distribution of z-x plane at y=1.1 m for a variation of airflow rate.

## 5.2 이산화탄소 농도

Fig. 5는 급·배기량 변화에 따라 재실자의 호흡선 높이의 단면에서 CO<sub>2</sub>의 농도분포를 나타낸 것이다. 강의실 앞쪽으로 급·배기량의 비율이 증가함에 따라 강의실 앞부분에서 재실자가 착석해 있는 주변 CO<sub>2</sub>의 농도는 점차 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 강의실 앞쪽으로 신선공기의 유입량이 증가하여 재실자에 의해 발생한 CO<sub>2</sub>의

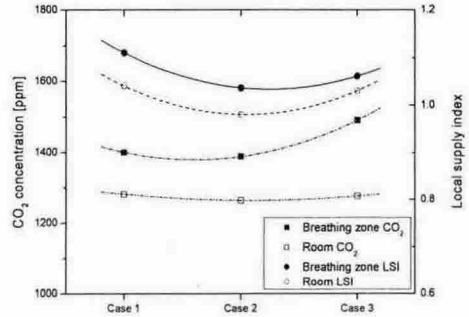


Fig. 6 CO<sub>2</sub> and local supply index at the breathing zone and room for a variation of airflow rate.

회색량이 증가하였기 때문으로 판단된다. 그러나 강의실 뒷부분의 경우 재실자에 의해 발생한 CO<sub>2</sub>를 희석시키기에 충분한 양의 신선공기가 공급되지 않아 재실자가 착석해 있는 강의실 뒷부분에서 CO<sub>2</sub>의 농도가 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 환기량 변화에 따른 재실자의 호흡선 높이의 영역과 실에서 CO<sub>2</sub>와 국소급기지수의 변화를 나타낸 것이다. 국소급기지수는 급·배기량의 변화에 따라 호흡선 영역과 실에서 같은 변화의 경향을 보이는 것으로 나타났다. CO<sub>2</sub>의 경우 강의실 앞쪽으로 급·배기량이 증가함에 따라 실 평균 CO<sub>2</sub>의 농도 변화는 거의 없으나 호흡선 높이의 영역에서 CO<sub>2</sub> 농도는 증가하는 것으로 나타났다. 이로부터 호흡선 영역에서 재실자에 의해 발생한 CO<sub>2</sub>의 배기에 문제가 있는 것으로 판단되었다.

## 6. 결론

본 연구에서는 환기량 변화가 실내 CO<sub>2</sub> 농도와 국소급기지수에 미치는 영향을 살펴본 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강의실 뒤쪽 급·배기량이 감소하더라도 강의실 뒤쪽 영역에서 국소급기지수가 높게 나타나는 것은 시스템에어컨에서 토출되는 냉기가 신선외기의 실내 분배를 유도하였기 때문으로 판단되었다.

2. 호흡선 높이의 영역에서 CO<sub>2</sub>의 농도 분포는

신선외기 도입량의 변화에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

3. 강의실 앞쪽으로 급·배기량이 증가함에 따라 실평균 CO<sub>2</sub>의 농도 변화는 거의 없지만 호흡선 높이의 영역에서 CO<sub>2</sub>의 농도는 증가하는 것으로 나타났다. 호흡선 영역에서 국소급기지수가 높아졌음에도 CO<sub>2</sub>의 농도가 낮아지지 않는 것은 호흡선 영역에서 배기 상태에 문제가 있다고 판단할 수 있었다. 따라서 추후 연구에서는 국소배기지수의 평가가 필요할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. Minister of Environment of KOREA, 2003, The Act of Indoor Air Quality for Multiple-Use Facilities, Minister of Law of KOREA.
2. Jang, J. S., Noh, K. C. and Oh, M. D., 2005, Study on the Relationship between Indoor CO<sub>2</sub> Concentration and Local Mean Air-age in the Lecture Room with System Air-conditioner and Ventilation Unit for Cooling Loads, Journal of SAREK, Vol. 17, No. 8, pp. 736-745.
3. Noh, K. C. and Oh, M. D., 2004, Analysis on the Optical Discharge Angle of the 4-way Air Conditioner by Thermal Comfort and Ventilation Indices, Proceedings of the SAREK 2004 Summer Annual Conference, pp 656-661.
4. Kim, K. H., Choi, H. S., Lee, G. G., Han, H. T. and Kwon, Y. I., 2004, The Characteristics of an Indoor Air Environment in Office with Location Supply and Exhaust Diffuser, Proceedings of the SAREK 2004 Summer Annual Conference, pp 734-738.
5. Kwon, Y. I. and Han, H. T., 2003, A Study on the evaluation of air change efficiency of multi-air-conditioner with outdoor air intake for heating season, Proceedings of the SAREK 2003 Winter Annual Conference, pp 543-548.
6. Naiping G., Jianlei N., 2004, CFD study on micro-environment around human body and personalized ventilation, Building and Environment, Vol. 39, No 7, pp. 795-805.
7. Noh, K. C., Jang, J. S., Oh, M. D., Lee, S. H., Park, J. H., Kim, S. H., 2005, Study on Thermal Comfort and Indoor Air Quality in the Classroom for Cooling Loads, Proceedings of the KSME 2005 Spring Annual Conference, pp 2465-2470.
8. Han, H. T., 1999, On the Definition of Ventilation Effectiveness, Magazine of the SAREK, Vol. 28, No. 1, pp. 38-47.