

< 논문 >

# 시스템에어컨과 환기시스템 설치 강의실에서 냉방시 열쾌적성 및 실내공기질 연구

노광철\* · 장재수\*\* · 오명도†

(2005년 7월 13일 접수, 2005년 12월 16일 심사완료)

## Study on Thermal Comfort and Indoor Air Quality in the Classroom with System Air-conditioner and Ventilation System for Cooling Loads

Kwang-Chul Noh, Jae-Soo Jang and Myung-Do Oh

**Key Words:** Indoor Air Quality(실내공기질), Predicted Mean Vote(예상온열감), System Air-conditioner (시스템에어컨), Thermal Comfort(열쾌적성)

### Abstract

The experimental and the numerical study was performed on the comparison of thermal comfort(TC) and indoor air quality(IAQ) in the lecture room for cooling loads when the operating conditions are changed. PMV value and CO<sub>2</sub> concentration of the lecture room were measured and compared with the numerical results. The numerical results showed a good agreement with the experimental one and then the numerical tool was used to analyze thermal comfort and IAQ for a couple of operating conditions. As a result it was found that the increment of the discharge angle of system air-conditioner makes TC uniformity worse, but rarely affects IAQ. Also TC and IAQ were hardly affected by the variation of the discharge airflow. Finally it turned out that TC is merely affected by the increment of the ventilation airflow, but the average CO<sub>2</sub> concentration can be satisfied with Japanese IAQ standards of classrooms when the ventilation airflow is more than 800m<sup>3</sup>/h in this study.

### 1. 서론

현대는 생활수준의 향상으로 안락하고 쾌적한 실내환경에서 살고자 하는 삶의 질 향상에 대한 요구가 점차 커지고 그 중요성이 과거 어느 때보다 강조되고 있으며 이에 따라 소비자들의 요구에 충족하도록 쾌적성, 편리성, 친환경성을 추구하는 well-being 개념이 모든 제품의 기본으로 대두되고 있다. 현대인의 생활환경을 시간적인 관

점에서 분석해 보면 24시간 중 90% 이상의 대부분의 시간을 실내에서 보내고 있다.<sup>(1)</sup> 이는 거의 모든 사람들이 밀폐된 실내에서 인공적인 환경에 노출되어 있다는 것을 의미한다. 한편 2000년 이후 우리나라에서는 개별냉방을 위한 에어컨의 보급이 증가되면서 쾌적한 실내 공기환경을 원하는 요구는 더욱 커지고 있으며 사용자의 개성을 존중하는 생활문화와 공간의 특성을 고려하면서 기존의 중앙식 공조방식을 벗어난 시스템에어컨(system air-conditioner) 등의 개별식 공조방식이 도입되고 있다.<sup>(2)</sup> 특히 시스템에어컨의 경우에는 실내 열 및 공기환경제어를 위해서 냉난방 공간의 적절한 온습도 및 기류분포를 확보하여야 하고 적절한 환기시스템(ventilation system)이 적용되어야 한다. 따라서 향후의 모든 실내환경 제어에 관한 연구는 공간의 재실자에 대한 열쾌적성과 환기를 통한 공기질개선에 대한 연구를 동시

† 책임저자, 회원, 서울시립대학교 기계정보공학과  
E-mail : mdoh@uos.ac.kr

TEL : (02)2210-2756 FAX : (02)2248-5110

\* 회원, 서울시립대학교 대학원 기계정보공학과

\*\* LG전자 DAC연구소

에 수행하여야 한다.

그러나 아직까지는 실내에서의 주된 연구의 방향이 열쾌적성과 공기질에 대해 각각의 관점에서만 수행되어져 왔다. 열쾌적성 관점에서의 연구는 최영진 등<sup>(3)</sup>이 천장형 냉난방기의 취출온도와 3가지의 다른 교실규모에 따른 기류분포와 온도 분포로써 난방공조환경에 대한 평가를 수행하였고 조영진<sup>(4)</sup>이 측벽부하가 있는 존재하는 실내에서 디퓨저의 형상에 따른 ADPI의 특성에 관한 연구를 수행하였으며 김세현<sup>(5)</sup> 등은 실내에 복사부하가 고려된 경우에 평균복사온도가 온열쾌적지표(predicted mean vote, 이하 PMV라 칭함)에 미치는 영향에 대해 평가하였다. Wong and Khoo<sup>(6)</sup>는 싱가포르에 있는 여러 학교에서 열쾌적성을 측정하는 실험을 수행하여 ASHRAE에서 제시된 평가방법과 실제로 재실자가 느끼는 응답온열감(thermal sensation vote) 사이에는 약간의 차이가 있다는 것을 확인하였다.

공기질 관점에서의 연구는 환경부<sup>(1)</sup>에 의해 실내 공기오염 특성과 관리방법에 관해서 다각적인 연구가 수행되고 있다. 김태연<sup>(7)</sup>은 치환환기를 채택한 공간에서 실내 오염농도 형성에 대한 이론적 고찰과 수치적인 연구를 통하여 오염물질 발생원의 영향 및 확산정도, 오염물질 상승에 대한 구성비율로써 실내공기질에 관한 기여율을 정량적으로 해석할 수 있는 지표를 개발하였다. 안철린 등<sup>(8)</sup>은 학교건물의 공기질 개선을 위하여 단위 교실에 용량이 다른 환기시스템을 설치하고 이산화탄소의 농도에 따른 환기성능 분석을 수행하였다. Lee and Chang<sup>(9)</sup>은 홍콩에 위치한 5개의 학교에 대하여 실내공기질(측정물질 : CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, HCHO)을 측정하였고 PM<sub>10</sub>과 CO<sub>2</sub>가 실내공기질을 저하시키는 주요 원인을 밝혔다.

그리고 이들에 의한 악영향을 감소시키는 방법으로 환기와 공기정정기 사용의 중요성을 강조하였다. Fang 등<sup>(10)</sup>은 사무실에서 온·습도와 환기량을 변화시켜 가면서 공기쾌적감(perceived air quality)와 건물증후군(sick building syndrome) 등에 미치는 온·습도의 영향을 조사하였고 실내공기의 엔탈피가 낮은 범위에서 공기쾌적감이 우수해지는 결과를 보여주었다. 또한 건물에서 기류분포성능지표와 환기효율을 이용하여 수치적인 방법으로 열쾌적성과 실내공기질을 평가하는 기초적인 연구들이 수행되고 있다.<sup>(11,12)</sup>

그러나 아직까지는 실내에서 열쾌적성과 실내 공기질에 대해 동시에 평가하고 분석하는 실험적인 연구는 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 천정형 시스템에어컨과 환기시스템이 설치된 대학교 강의실을 대상으로 학생들이 수업을 받고 있는 상태에서 열쾌적성과 공기질을 평가하기 위하여 PMV와 이산화탄소의 농도를 측정하는 실험을 수행하였다. 동시에 실험과 동일한 실내·외의 열 및 환경부하 조건에서 시스템에어컨의 토출풍량과 각도, 환기시스템의 풍량을 변수로 열쾌적성과 공기질의 변화를 예측 평가하기 위한 수치적인 연구도 병행하였다.

## 2. 해석 모델

Fig. 1은 실험과 수치해석에 사용된 대상 강의실의 모델이다. 실험에 사용된 강의실은 냉·난방부하와 환경부하를 제어하기 위하여 천정형 시스템에어컨과 환기시스템을 동시에 설치하였다. 대상교실의 규격은 11.2m(L)×6.4m(W)×2.45m(H)이고 체적은 175m<sup>3</sup>이다. 천정에 설치된 4way 시스템에어컨의 중심은 x축 방향으로 5.6m에 위치하고 z

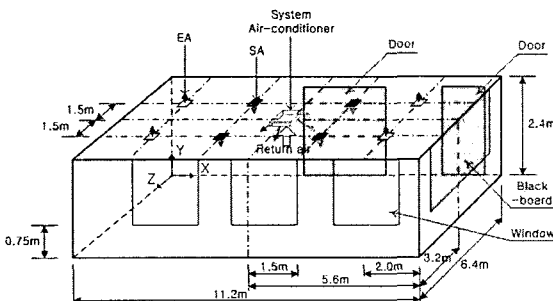


Fig. 1 Schematic design of the lecture room

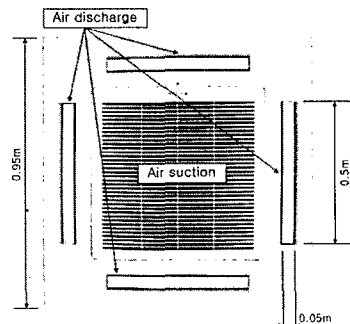


Fig. 2 Photograph of the system air-conditioner

축 방향으로 3.2m에 위치한다. 급·배기구는 각각 4개씩 설치되어 있고 이들의 위치 선정은 김경환<sup>(12)</sup> 등의 연구결과를 토대로 하였다. 본 연구에서 사용된 천정형 시스템에어컨은 Fig. 2와 같은 4-way cassette 형태로 규격은 0.95m(L)×0.95m(W)이다. 실내 공기는 시스템에어컨의 중앙부로 유입되어 시스템에어컨 내부에 장착된 중성능필터를 통과하면서 먼지의 일부가 제거되고 온도가 제어된 후 냉기토출부를 통하여 실내로 취출된다. 대상 강의실의 냉방부하를 제어하기 위한 에어컨은 토출풍량이 1380m<sup>3</sup>/h과 1740m<sup>3</sup>/h, 토출각도는 천정면으로부터 30°~60° 사이에서 변화되어진다. 실내공기질 개선을 위한 환기시스템은 에너지절약을 위하여 전열효율이 약 65%인 열교환방식의 장치가 설치되었고 풍량은 800m<sup>3</sup>/h와 1000m<sup>3</sup>/h 사이에서 변동할 수 있다. 강의실 내 재실 인원은 30명으로 재실자의 대부분은 수강을 위하여 강의실 앞부분에 정좌해 있다.

### 3. 평가방법

#### 3.1 예상온열감(PMV)

PMV는 인간의 온열환경에 대한 반응을 정량화시킨 것으로 인체의 대사율, 의복의 열저항치 등과 건구온도, 평균복사온도, 기류, 습도 등을 종합적으로 고려하여 인체가 느끼는 온열쾌적도를 이론적으로 나타낸 것이다. 본 논문에서는 온열쾌적도를 평가하기 위하여 ISO Standard 7730에서 규정하고 있는 PMV계산법을 사용하였다.<sup>(13)</sup> PMV 지표는 식 (1)을 이용하여 계산하고 Table 1에서와 같이 7단계로 온열쾌적도를 구분하고 쾌적범위는 -0.5~0.5로 규정하고 있다.

$$PMV = (0.303e^{-0.0036M} + 0.28) \times [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}] \quad (1)$$

여기서, M은 인체의 신진대사율을 나타내고, W는 외부로 행하는 일을 나타내며, H는 현열을

Table 1 The PMV index with thermal comfort

PMV index	-3	-2	-1	0	1	2	3
	cold	cool	slightly cool	neutral	slightly warm	warm	hot

통한 열손실, E<sub>c</sub>는 피부를 통한 증발 열전달, C<sub>res</sub>는 호흡을 통한 대류 열전달, E<sub>res</sub>는 호흡을 통한 증발 열전달을 각각 나타낸다. 계산시 사용된 인체의 신진대사량은 일반적인 정좌상태인 1.2met을 적용하였고, 착의상태는 여름철 평상복 차림으로 가정하여 0.5clo를 사용하였다.

#### 3.2 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도

학교시설에서 건축재료에 의해 발생하는 휘발성 유기화합물이나 포름알데히드를 제외하고 실내공기질에 크게 영향을 미치는 물질은 미세분진(PM<sub>10</sub>)과 CO<sub>2</sub>로 알려져 있다.<sup>(9)</sup> 그러나 우리나라의 경우 황사가 발생하는 봄철을 제외하고는 대부분의 실내에서 150μg/m<sup>3</sup>이하의 농도를 유지한다.<sup>(1)</sup> 특히 장마가 지난 여름철 이후 대기 및 실내에서의 PM<sub>10</sub> 농도는 허용기준치의 1/2 이하로 낮아진다. 따라서 본 연구에서는 측정대상으로 CO<sub>2</sub>만을 선정하여 연구를 수행하였다.

CO<sub>2</sub>는 무색, 무미, 무취의 기체로 일반적으로 의탄섭이나 교산지에서는 380ppm 정도 포함되어 있는 것으로 알려져 있으며 도심의 대기 중에는 위치에 따라 400~600ppm의 농도로 측정된다. 이산화탄소는 지구온난화 가스로 주목받고 있으나 대기오염물질로 분류되지는 않고 있다. CO<sub>2</sub>는 2000ppm이상이 되면 인체에 영향을 미칠 수 있는 상태가 된다.<sup>(1)</sup> 그러나 국내 실내공기질 기준<sup>(14)</sup>에서는 CO<sub>2</sub> 농도가 1000ppm 이하로 규정되어 있다. CO<sub>2</sub>는 실내에서 그 농도가 증가하면 체열방산에 의한 온·습도의 증가뿐만 아니라 분진, 세균 등도 불량한 상태로 되는 경우가 많으므로 환기상태를 평가하는 지표로 자주 사용된다.

학교시설에서의 CO<sub>2</sub> 농도 기준은 우리나라의 경우 1,000ppm을 권장하고 있으나 일본은 1,500ppm

Table 2 Experimental cases conducted with different operating conditions

case	Operating conditions	
	System air-conditioner discharge airflow rate (m <sup>3</sup> /h)	Ventilation system airflow rate (m <sup>3</sup> /h)
1	1380	800
2	1740	800
3	1740	1000

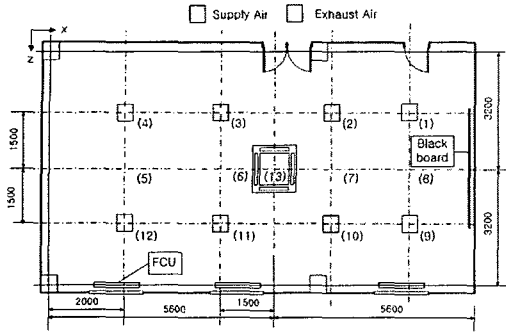


Fig. 3 Measuring points located in the section of 1.1m high from the bottom

을 기준으로 하고 있다.<sup>(8)</sup> 따라서 본 연구에서는 CO<sub>2</sub>의 농도를 1,000ppm과 1,500ppm을 기준으로 하여 실내공기질을 평가하였다.

#### 4. 연구 방법

##### 4.1 실험

열쾌적성과 공기질을 평가하기 위하여 환기시스템과 천청형 시스템에어컨이 설치된 강의실에서 PMV와 이산화탄소의 농도를 측정하는 실험을 수행하였다. 실험이 수행되었을 때 재실자의 인원은 총 30명이다. 실험은 Table 2와 같은 3가지 경우에 대해서 이루어졌고 각각에 대해 2~3회씩의 실험이 수행되었다. 표에서 case 1과 2는 열쾌적성에 대한 비교 연구를 위한 실험이고, case 2와 3은 공기질에 대한 비교 연구를 위하여 수행된 실험이다. 실험시 시스템에어컨의 냉기 토출각도는 30°로 고정하였다. 이는 냉기토출각도를 50°로 한 경우 냉기가 직접 재실자에 도달하여 불만족도를 증가시키고 피실험자에게 해를 끼칠 수 있기 때문이다. 실험장치는 Innova사의 model 1221을 사용하여 PMV를 측정하였고, Graywolf사의 model IAQ-410을 이용하여 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하였다. 본 연구는 시스템에어컨과 환기시스템의 조건에 따라 열쾌적성과 공기질을 평가하고 비교하는 연구를 수행하는 것이기 때문에 강의실에서 학생들이 실제 수업을 듣고 있는 상태에서 실험을 실시하였다. 측정점의 수는 모든 경우에 대해 13개의 위치를 선정하였고 측정위치는 Fig. 3과 같다. 모든 측정은 교실의 중앙 부분인 (13)번 위치에서 온습도와 CO<sub>2</sub> 농도가 모두 안정화된 이

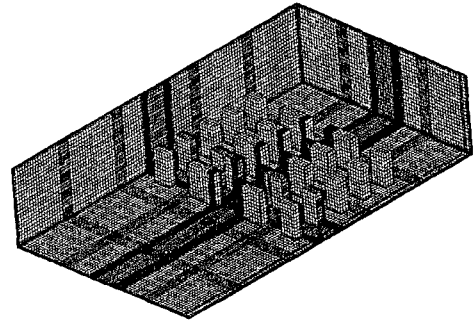


Fig. 4 Grid system and location of occupants

후 각 측정점에서 약 5분정도 샘플링이 이루어졌고 이들의 평균값으로 결과를 나타냈다.

##### 4.2 수치해석

본 연구에서와 같이 강의실 냉방시 수행된 실험은 측정일이 모두 다르기 때문에 실외의 냉방 및 환경부하가 약간씩 변화가 있다. 이러한 이유로 결과의 비교, 평가에 있어서 다양한 작동조건에 따른 결과들의 정량적인 비교는 한계가 따른다. 따라서 본 연구에서는 Table 2에 제시된 3가지 경우에 대해 각각 실험 당시의 경계조건을 고려한 수치해석 결과와 실험값을 비교하였고 이로부터 적절한 실·내의 부하를 산정하였다. 그리고 이를 새로운 경계조건으로 수치모델에 적용하여 시스템에어컨의 토출풍량과 토출각도, 환기시스템의 풍량을 변화시키면서 강의실 내에서 재실자가 느끼는 열쾌적성과 공기질을 비교하고 평가하는 연구를 수행하였다.

대부분의 건물 내부에서의 유동은 난류이다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 수행할 때 standard  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하였으며 온도차에 의한 부력효과를 운동량방정식의 생성항으로 포함시켰다. 공기유동과 가스농도 수송방정식은 다음과 같은 정상상태 Navier-Stokes 방정식으로 표현된다.<sup>(15)</sup>

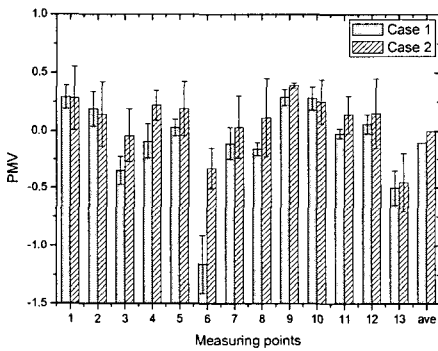
$$\text{div}(\rho \mathbf{V}\Phi - \Gamma_{\phi, \text{eff}} \text{grad } \Phi) = S_{\phi} \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 공기밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $\Gamma_{\phi, \text{eff}}$ 는 유효확산계수(kg/ms),  $\mathbf{V}$ 는 유속벡터(m/s),  $S_{\phi}$ 는 방정식 특성에 기인한 생성항,  $\phi$ 는 각 방향의 속도, 난류

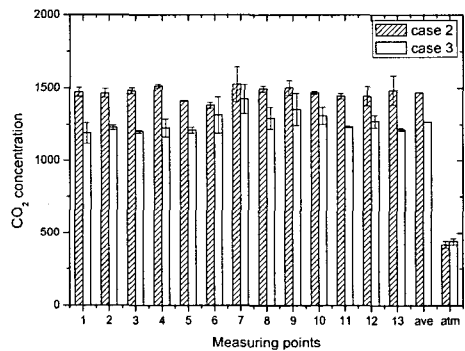
**Table 3** Terms, Coefficients and constants in Eq. (1)

Equations	$\Phi$	$\Gamma_{\phi, \text{eff}}$	$S_{\phi}$
Continuity	1	0	0
Momentum	$U_i$	$\mu_{\text{eff}}$	$-\partial P / \partial x_i + g_i(\rho - \rho_0)$
Turbulence kinetic energy	$k$	$\mu_{\text{eff}} / \sigma_k$	$P_k - \rho \epsilon + G_k$
Turbulence kinetic energy dissipation rate	$\epsilon$	$\mu_{\text{eff}} / \sigma_{\epsilon}$	$\epsilon(C_1 P_k - C_2 \epsilon) / k + C_3 G_k \epsilon / k$
Thermal energy	$T$	$\mu_{\text{eff}} / \sigma_T$	$S_T$
Concentration	$C$	$\mu_{\text{eff}} / \sigma_C$	$S_C$

$P_k = \mu(U_{ij} + U_{ji})U_{ij}$ ,  $\mu_{\text{eff}} = \mu_t + \mu$ ,  $\mu_t = C_{\mu} \rho k^2 / \epsilon$ ,  
 $(\sigma_k, \sigma_{\epsilon}, \sigma_T, \sigma_C, C_1, C_2, C_3) = (1.0, 1.314, 0.9, 1.0, 1.44, 1.92, 1.0, 0.09)$



**Fig. 5** PMV index at the measuring points for the discharge airflow of the system air-conditioner



**Fig. 6** CO<sub>2</sub> concentration at the measuring points for the airflow rate of the ventilation system

**Table 4** Boundary conditions for the numerical calculation

Category	Input data
Outdoor temperature (°C)	29
Unit thermal conductance (W/m <sup>2</sup> °C)	Exterior wall : 0.57 Indoor wall : 3.29 Window : 3.26 Door : 5.93
Discharge temperature of system air-conditioner (°C)	16
Outdoor CO <sub>2</sub> concentration (ppm)	420

에너지, 난류소산에너지, 가스농도 등을 나타낸다. Table 3에 이에 대한 자세한 내용이 기술되어

있다. 본 연구에서는 난류에너지의 유입조건을 지정하기 위하여 난류강도를 10%로 채택하였다. 그 외의 지배방정식과 함께 사용된 경계조건에 상세한 내용은 Table 4에 나열하였다. 식 (2)의 지배방정식은 SIMPLE 알고리즘<sup>(15)</sup>을 적용하고 상용 CFD코드인 STAR-CD를 사용하여 계산이 수행되었다. 그리고 대류항에 대한 계산을 위하여 2차의 상류차분도식(second order upwind scheme)을 사용하였다. 계산시 수렴판정 조건으로는 입구에서의 유입질량률과 운동량으로 정규화한 각 셀(cell)에서의 운동량 유수의 합과 연속방정식에서 유수의 합이 모두 10<sup>-3</sup>이하로 하였고, 온도장과 농도장은 이전 계산값과 새로운 계산값의 차이를 이전 계산값으로 나눈 값이 10<sup>-4</sup>이하일 때로 정하였다. 격자는 약 450,000개를 사용하였고 유동변화가 심하게 이루어지는 부분에 대해서는 격

자를 조밀하게 배치하는 비균일 격자계를 사용하였다. 정좌상태의 재실자는 0.45m(W)×1.05m(H)×0.3m(L)의 직육면체로 모델링 하였으며 재실자 피부의 온도는 33℃로 정하였다. 또한 재실자는 시간당 0.018m<sup>3</sup>의 CO<sub>2</sub>를 배출한다고 가정하였다.<sup>(16)</sup> Fig. 4는 연구에서 사용된 격자계 구조와 재실자의 배치를 보여준다.

### 5. 결과 및 고찰

#### 5.1 실험결과

Fig. 5는 Table 2에서 제시된 case 1과 2에 대해 3회의 동일한 실험을 수행하였을 때의 결과를 보여준다. 실험시에 외기의 온도는 25~30℃, 습도는 50~55%로 변화하였지만 실내에서의 건구온도는 23.5±1.5℃, 평균복사온도와 벽면온도는 25.5±1℃로 대체로 균일하게 나타났고 실내 습도는 온도의 변화에 따라 53±5%를 유지하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 시스템에어컨의 토출풍량만 변하는 case 1과 2는 강의실 내에서 PMV의 평균값이 -0.1과 0으로 나타났다. 그리고 대부분의 위치에서 PMV값들이 온열쾌적범위인 -0.5~0.5사이로 유지되고 있어 실험이 수행된 강의실은 열적으로 쾌적하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 시스템에어컨이 설치된 아래부분(13번 측정점)과 그 바로 윗부분(6번 측정점)에서는 쾌적범위를 초과하여 인체가 약간 싸늘하게 느낄 수 있는 것으로 나타났다. 이 부분들이 온열쾌적범위를 초과하게 된 이유는 강의실 앞쪽은 수강을 위하여 대부분의 재실자들이 착석해 있어 인체에 의한 냉방부하의

영향을 받고 벽면에 인접한 측정점에서는 벽면 냉방부하의 영향을 받기 때문이다. 그러나 6과 13번 측정점에서는 냉방부하의 영향이 다른 측정위치보다 상대적으로 적기 때문에 PMV가 낮게 측정되는 것이다. 그리고 본 실험에서는 시스템에어컨의 토출풍량에 따라 측정점에서의 PMV 변화는 찾을 수가 없었다. 이는 에어컨의 토출각도가 30°로 고정되어 있어서 대부분의 토출냉기가 벽면을 따라 이동하기 때문에 벽면부하로 인한 온도증가로 측정위치에서 감지된 PMV의 변화는 거의 없는 것처럼 나타난 것으로 판단된다. 또한 실험이 수행되는 동안 측정일과 시간에 따라 일사량, 외기온도 등의 외기부하가 약간씩 변화하여 계측장치의 세팅조건을 동일하게 하여도 실험값은 편차를 가질 수 있다. 그러나 동일한 경계조건들이 주어지고 시스템에어컨의 토출풍량이 더욱 증가하면 냉기의 순환시간이 짧아져서 더 많은 냉방부하를 감당할 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 6은 Table 2에서 제시된 case 2와 3에 대해 2회의 동일한 실험을 수행하였을 때의 실내 CO<sub>2</sub> 농도에 대한 측정결과이다. case 2와 3은 각각 환기시스템의 풍량이 800m<sup>3</sup>/h, 1000m<sup>3</sup>/h일 때로서 시스템에어컨의 세팅조건은 동일하다. 실험시 측정된 외기의 농도는 각각 420±20ppm, 440±30ppm이었다. case 2의 경우 강의실 내에서 측정된 CO<sub>2</sub> 평균값은 1470ppm, case 3은 1270ppm으로 측정되었다. 즉, 환기시스템의 풍량이 200m<sup>3</sup>/h 증가함에 따라 실내 CO<sub>2</sub>의 농도는 약 220ppm 감소한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 CO<sub>2</sub>의 농도는 전체 측정위치에서 대체로 균일하게 측정되었

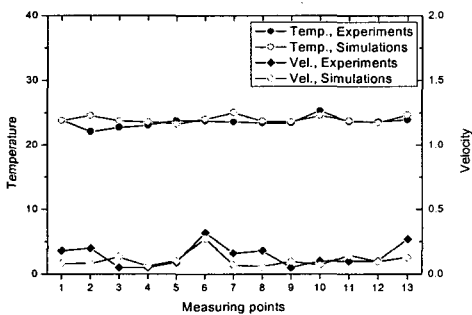


Fig. 7 Comparison of experiments and simulation results for temperature and velocity at the measuring points

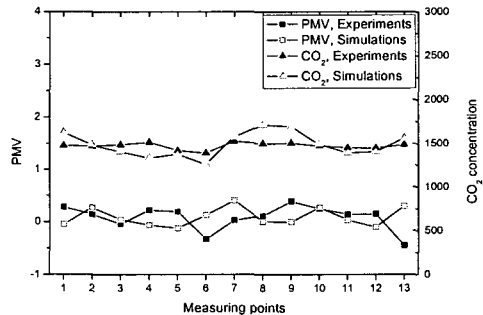


Fig. 8 Comparison of experiments and simulation results for PMV and CO<sub>2</sub> concentration at the measuring points

다. 그리고 강의실 뒤쪽보다 앞쪽에서 약간 높게 측정되는데 이는 재실자가 수강을 위하여 앞쪽으로 착석해 있었기 때문이다. 본 연구에서 CO<sub>2</sub>의 측정값들은 국내의 ‘다중이용시설등의 실내환경기준법’<sup>(4)</sup>에서 제시된 이산화탄소의 유지기준인 1000ppm을 초과하여 강의실 내부의 환기량이 부족한 것으로 나타났지만 일본의 기준치<sup>(8)</sup>인 1500ppm보다는 낮게 측정되었다. 그러나 앞서 3.2절에서 언급한 바와 같이 2000ppm까지는 임상적으로 문제가 없는 것으로 알려져 있기 때문에 실내공기질은 나쁘지 않은 것으로 판단된다.

5.2 수치해석 결과

앞 절에서 case 2가 측정점에서 PMV 평균값이 약 0.1로 측정되었고 CO<sub>2</sub>의 농도도 1500ppm이하로 측정되어 다른 경우에 비해 열쾌적성과 공기질을 모두 잘 만족시키는 것으로 나타났다. 따라서 이때의 경계조건을 중심으로 실험변수에 따른 열쾌적성 및 공기질의 평가를 수치적으로 수행하였다. 구체적 평가를 수행하기에 앞서 수치계산의 타당성을 검증하기 위하여 case 2의 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다.

5.2.1 수치해석의 타당성 검토

Fig. 7은 속도와 온도에 대하여 실험결과와 수치계산 결과를 보여준다. 온도의 경우에는 전체 측정점에서 실험과 수치해석 결과가 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 실험결과의 평균값 약 23.5℃, 수치계산 결과의 평균값은 약 24℃로 측정되어 실험결과보다 수치계산 결과가 약 0.5℃ 높게 측정되었고 이때 상대오차는 최대 10%를 초과하지 않았다. 속도의 경우에는 온도의 경우

보다 실험결과와 수치계산 결과의 상대오차가 더 커지는 것으로 나타났다. 측정위치에서의 평균값은 각각 0.14m/s와 0.11m/s로 측정되었다. 이때 절대오차는 모두 10% 이내를 만족하지만 상대오차의 최대값이 약 50%로 나타나서 편차가 큰 것으로 확인되었다. 이렇게 편차가 큰 이유는 수치해석의 경우 재실자의 위치와 시스템에어컨에서의 토출유량, 환기시스템의 급기풍량을 고정시켜 계산이 수행되는 것과는 달리 재실영역에서의 유속은 0.3m/s 이하로 매우 작아서 재실자들의 활동이나 착석위치 변화, 토출유량의 맥동현상 등에 따라 유속이 쉽게 변할 수 있기 때문이다. Fig. 7에서 재실자가 위치한 강의실 앞쪽이 뒤쪽보다 오차가 크게 나타나는 것으로부터 이를 다시 한번 확인할 수 있다.

Fig. 8은 PMV와 CO<sub>2</sub>농도에 대하여 실험결과와 수치계산 결과를 비교한 것이다. PMV의 경우 측정점에서의 평균값은 각각 0.083과 0.085로서 거의 일치하는 것으로 나타났고 실험과 수치계산 결과 모두 쾌적범위인 -0.5~0.5를 잘 만족하고 있다. 하지만 그림에서 보듯이 부분적으로는 오차가 크게 나타났다. 이는 주로 복사온도에 대한 부정확한 예측의 결과라고 판단된다. 본 연구에서는 Fanger의 방법을 이용하여 복사온도와 PMV를 계산하였으나<sup>(5,13)</sup> 실험결과와 같이 일복사와 벽면복사온도 등의 변화들을 수치해석에서는 정확하게 고려하기 어렵기 때문이다. CO<sub>2</sub>의 농도는 측정위치에서의 평균값이 각각 1470ppm와 1481ppm으로 나타나서 실험결과와 수치계산결과가 잘 일치하는 것으로 확인되었고 이때 측정된 상대오차도 최대 12%를 초과하지 않았다. Fig. 8에서 실험결과와 수치계산 결과 모두 재실자가

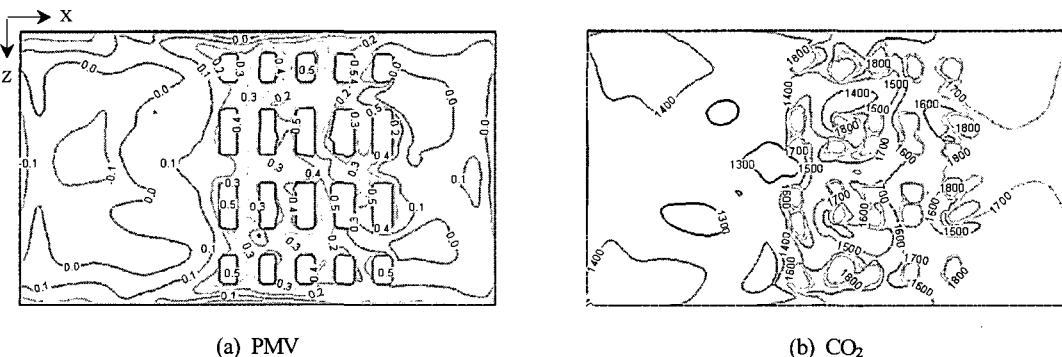
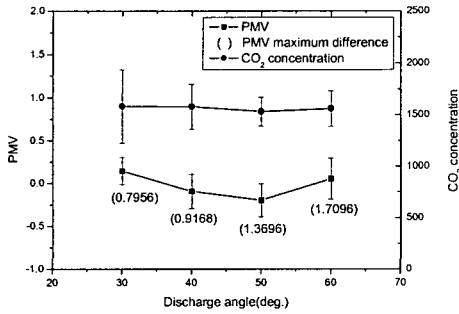


Fig. 9 Numerical results for PMV and CO<sub>2</sub> distribution of the x-z plane at y=1.1m in the case of 2

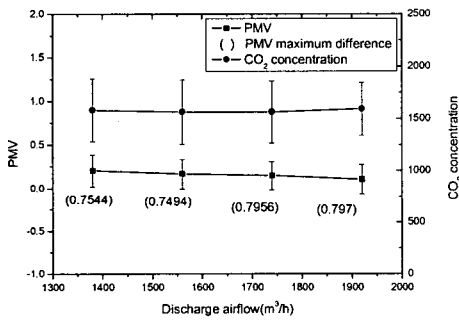
위치한 앞쪽이 뒤쪽보다 CO<sub>2</sub>농도가 높게 나타나서 정성적인 경향은 비슷하게 나타났으나 수치계산결과가 실험결과에 비해 정량적인 편차가 더 큰 것을 확인할 수 있었다. Fig. 9는 착석시 호흡

선 높이(y=1.1m)에서 case 2에 대한 수치해석 결과이다.

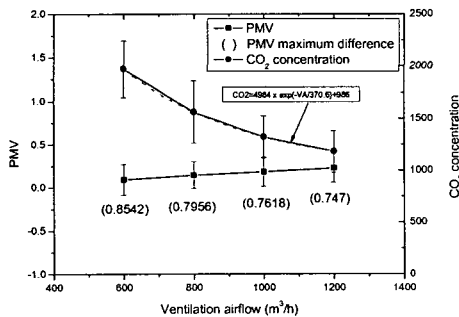
이상의 결과로부터 본 연구의 수치적 방법은 공학적 응용에 있어서 타당하다고 판단되었고 이를 이용하여 다양한 실험변수의 변화에 따른 열쾌적성 및 실내공기질의 평가를 수행하였다.



(a) When the discharge angle is varied



(b) When the discharge airflow is varied



(c) When the ventilation rate is varied

**Fig. 10** Variation of PMV and CO<sub>2</sub> concentration for the discharge angle, the airflow of system air-conditioner or the airflow rate of ventilation system

### 5.2.2 열쾌적성 및 실내공기질 평가

Fig. 10(a)는 시스템에어컨의 냉기토출각도에 따른 PMV와 CO<sub>2</sub> 평균농도의 변화를 보여준다. 이때 시스템에어컨의 토출풍량은 1740m<sup>3</sup>/h, 환기 시스템의 급기풍량은 800m<sup>3</sup>/h이고 이 결과들은 y=1.1m 높이의 단면에서 계산된 것이다. PMV의 경우 계산이 수행된 30°~60°의 토출각도에서 모두 쾌적범위(-0.5~0.5)를 만족하는 것을 알 수 있다. 냉기토출각도가 증가함에 따라 PMV는 계속 감소하였으나 50° 이후에는 다시 증가하는 경향을 보였다. 하지만 재실영역에서 열쾌적감의 균일도를 나타내는 PMV 표준편차와 최대편차는 계속 증가하는 것으로 나타났다. 특히 토출각도가 50°, 60°인 경우에는 PMV의 최소값이 하한 쾌적범위를 크게 벗어나는 것으로 나타났다. 이는 토출각도가 증가하면서 재실영역에 직접 도달하는 냉기가 증가하고 이로 인하여 온도와 속도의 국부적인 편차 또한 점차 증가하기 때문이다. 결국 이러한 온도와 속도의 국부적인 편차는 재실자에게 열적 불쾌감을 증가시키는 원인으로 작용하게 된다. 따라서 본 연구에서와 같이 재실자가 주로 앉아서 수업을 듣는 경우에는 토출각도가 40°를 초과해서는 안 될 것으로 판단되었다. 그러나 만약 재실자가 서 있는 상태라면 토출각도가 40°인 경우에도 얼굴부위(약 1.7m 높이)에서 유속이 0.25m/s를 초과하는 영역이 존재하여 재실자가 불쾌감을 느낄 수 있을 것으로 판단된다.<sup>(13)</sup> 따라서 이후의 논의에서는 열쾌적감을 가장 잘 만족시키는 토출각도인 30°인 경우의 결과만을 이용하여 평가를 수행하였다. 그리고 CO<sub>2</sub> 농도는 시스템에어컨의 냉기토출각도에 따라 크게 변하지 않는 것으로 나타났다. CO<sub>2</sub>농도 표준편차는 냉기 토출각도가 증가함에 따라 재실영역에서는 감소하는 것으로 나타났지만 그 변화량이 평균농도의 10% 이하로 작게 나타났다. 이러한 결과들은 토출각도가 재실영역으로 유입된 공기의 실내체류 시간(residence time)에 아무런 영향도 미치지 못



하는 것을 의미한다. 따라서 시스템에어컨의 토출각도는 실내공기질에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 판단되었다.

Fig. 10(b)는 시스템에어컨의 냉기토출풍량에 따른 PMV와 CO<sub>2</sub>농도 평균농도의 변화를 보여준다. 이때 시스템에어컨의 토출각도는 30°, 환기시스템의 급기풍량은 800m<sup>3</sup>/h이고 이 결과들은 y=1.1m 높이의 단면에서 계산된 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 PMV는 토출풍량이 증가함에 따라 180m<sup>3</sup>/h당 0.025정도로 미세하게 작아지는 것으로 나타났지만 토출풍량이 1380~1920m<sup>3</sup>/h인 범위에서는 모두 쾌적범위를 만족하는 결과를 보였다. 그리고 PMV의 표준편차와 최대편차는 거의 균일하게 나타났다. 실내 CO<sub>2</sub> 농도의 경우에도 PMV결과에서와 같이 냉기토출풍량에 따른 변화를 관찰할 수는 없었고 표준편차도 거의 비슷하게 계산되었다. 이로부터 시스템에어컨의 냉기토출각도와 토출풍량은 실내공기질에 미치는 영향이 거의 없는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서와 같은 부하조건이 적용된 강의실의 경우에는 운전범위내의 토출풍량을 감소시켜도 실내공기질에 미치는 영향이 없기 때문에 이를 활용하면 시스템에어컨에 대한 에너지절약이 가능할 것으로 판단되었다.

Fig. 10(c)는 환기시스템의 급기풍량에 따른 PMV와 CO<sub>2</sub>농도 평균농도의 변화를 보여준다. 이때 시스템에어컨의 토출각도는 30°, 토출풍량은 1740m<sup>3</sup>/h이고 이 결과들은 y=1.1m 높이의 단면에서 계산된 것이다. PMV는 환기시스템의 급기풍량이 증가함에 따라 200m<sup>3</sup>/h당 약 0.023씩 증가하는 경향을 보였다. 이는 시스템에어컨 주위에 위치한 급기구에서 전열교환효율이 65%이기 때문에 외기도입량이 증가함에 따라 강의실 내부의 온도를 상승시키는 효과가 있기 때문이다. 이로 인하여 재실영역에서 PMV의 최대편차도 점차 감소하는 현상도 볼 수 있었다. 그리고 급기풍량의 증가에 따른 PMV의 표준편차 변화는 거의 나타나지 않아서 환기량의 변화가 재실영역에서 열쾌적감 균일도에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 그러나 CO<sub>2</sub>의 경우에는 환기시스템의 급기풍량이 증가함에 따라 농도가 지수함수적으로 감소하는 현상을 보였다. 그 이유는 환기량이 증가하면 실내 CO<sub>2</sub> 농도가 급하게 감소하다가 재실자에 의한 CO<sub>2</sub> 발생량과 배경농도

(420ppm)에 의해 임의의 적정량으로 수렴할 수밖에 없기 때문이다. 이러한 경향은 Fig. 10(c)에서 수치해석에 의해 계산된 결과들을 실선으로 curve fitting한 식으로부터 확인할 수 있다. 환기시스템의 급기풍량이 800m<sup>3</sup>/h 이상이 되면 실내 CO<sub>2</sub>의 농도가 일본의 기준<sup>(8)</sup>인 1500ppm보다는 낮아져서 실내공기질은 문제가 없을 것으로 판단된다. 하지만 국내의 학교보건법<sup>(9)</sup>이나 기타 관련법<sup>(14)</sup>에 제시된 기준인 1000ppm으로 평가해 보면 본 연구의 계산에서 사용된 최대 환기풍량인 1200m<sup>3</sup>/h로도 국내의 기준을 만족시키지는 못하였다. 그리고 본 연구에서 curve fitting한 식을 이용하여 국내 기준을 만족하기 위한 환기량을 계산하면 1500m<sup>3</sup>/h 이상의 급기풍량이 필요한 것으로 나타났다. 그러나 현실적으로 환기시스템의 급기풍량의 증가는 실내 소음문제를 발생시킬 수 있고 환기시스템의 크기가 커질 수 있다. 설치 대수를 늘리는 대안도 설치상의 문제들이 발생할 수도 있으며 에너지 관점에서도 큰 손실을 일으키게 된다. 따라서 국내의 실내환경 관련법<sup>(8,14)</sup> 중 CO<sub>2</sub> 농도기준치에 관한 사항을 국제기준<sup>(8,16)</sup>과 동일하게 변경할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 본 연구에서와 같은 강의실의 경우 열쾌적성, 공기질, 에너지절약의 관점에서 운전변수들을 평가해 보면 시스템에어컨의 토출각도와 풍량, 환기시스템의 급기풍량을 각각 30°, 1380m<sup>3</sup>/h, 800m<sup>3</sup>/h로 했을 때에 가장 우수한 결과가 나타나는 것으로 확인되었다.

## 6. 결론

시스템에어컨과 환기시스템이 설치된 강의실에서 냉방시 운전변수에 따른 열쾌적성과 공기질에 대한 평가를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 시스템에어컨의 냉기 토출각도가 증가함에 따라 열쾌적감의 균일도를 나타내는 PMV 표준편차와 최대편차는 계속 증가하는 것으로 나타났고 이로부터 토출각도가 30°일 때 재실영역에서 열쾌적감을 가장 잘 만족시키는 것을 알 수 있었다. 그리고 시스템에어컨의 토출각도는 실내공기질에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

(2) 시스템에어컨의 냉기 토출풍량의 변화는 재실영역에서의 열쾌적감 균일도에 큰 영향을 미치

지 못하는 것으로 나타났고 실내공기질에 미치는 영향도 거의 없는 것을 알 수 있었다.

(3) 환기시스템의 급기풍량의 변화는 재실영역에서 열쾌적감 균일도에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 그러나 CO<sub>2</sub>의 경우에는 환기량이 증가함에 따라 농도가 지수함수적으로 감소하는 현상을 보였고 이로부터 실내공기질을 위해서는 적절한 필요환기량의 산정이 중요할 것으로 판단되었다.

(4) 본 연구에서와 같은 강의실의 경우 열쾌적성, 공기질, 에너지절약의 관점에서 운전변수들을 평가해 보면 시스템에어컨의 토출각도와 풍량, 환기시스템의 급기풍량을 각각 30°, 1380m<sup>3</sup>/h, 800m<sup>3</sup>/h로 했을 때에 가장 우수한 결과를 나타내었다.

### 참고문헌

- (1) Minister of Environment of Korea, 2002, "A Study on Indoor Air Pollution Characterization and Management," Minister of Environment of Korea.
- (2) Kim, Y. C. and Oh, M. D., 2004, "Establishing a Standard for Multi-Split Air-Conditioners and Overview on ISO Draft," *Proceedings of the SAREK 2004 Summer Annual Conference*, pp. 1004~1007.
- (3) Choi, J. M., Kim, Y. i. and Park, H. S., 2003, "A Study on the Evaluation of Heating-Conditioned Environment with the Size of Classroom," *Journal of SAREK*, Vol. 15, No. 12, pp. 1035~1042.
- (4) Cho, Y. J., 2001, "ADPI Characteristics of Diffuser in a Room with Perimetric Heating Load," Ph.D. Dissertation, Hanyang University.
- (5) Kim, S. H., Noh, K. C. and Oh, M. D., 2003, "Evaluation of Thermal Comfort in Consideration of the Solar Radiation," *Journal of SAREK*, Vol. 16, No. 12, pp. 1140~1148.
- (6) Wong, N. H. and Khoo, S. S., 2003, "Thermal Comfort in Classrooms in the Tropics," *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 337~351.
- (7) Kim, T. Y., 2004, "Analysis of Contribution Ratio of Pollutant Sources to Indoor Air Quality," *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 20, No. 2, pp. 209~216.
- (8) Ahn, C. L., Kim, J. J., Kum, J. S. and Park, H. S., "A Study on the Using the Ventilation System as the Method of Improvement of Air Quality in the Schools," *Journal of Korean Institute of Education Facilities*, Vol. 11, No. 2, pp. 17~23.
- (9) Lee, S. C. and Chang, M., 1999, "Indoor Air Quality Investigations at Five Classrooms," *Indoor air*, Vol. 9, pp. 134~138.
- (10) Fang, L., Wyon, D. P., Clausen, G. and Fanger, P. O., 2004, "Impact of Indoor Air Temperature and Humidity in an Office on Perceived Air Quality, SBS Symptoms and Performance," *Indoor Air*, Vol. 14, pp. 74~81.
- (11) Kim, K. H., Lee, K. S., Choi, H. S., Kang, T. W., Chung, B. Y. and Lee, G. G., 2003, "A Study on the Indoor Thermal and Ventilation Characteristics in Office Building with Air-Conditioning and Ventilation System," *Proceedings of the SAREK 2003 Summer Annual Conference*, pp. 1111~1116.
- (12) 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 of Supply and Exhaust Diffuser," *Proceedings of the SAREK 2004 Summer Annual Conference*, pp. 734~738.
- (13) ASHRAE, 2004, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE Standard 55-2004, ASHRAE, Atlanta, Georgia.
- (14) Minister of Environment of Korea, 2003, "The Act of Indoor Air Qualities for Multiple-Use Facilities," Minister of Law of Korea.
- (15) Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, DC.
- (16) ASHRAE, 2001, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, ANSI/ASHRAE Standard 62-2001, ASHRAE, Atlanta, Georgia.