

강의실에서 환기시스템과 난방시스템의 풍량에 따른 PMV와 CO₂ 농도 특성 비교

한 창 우, 노 광 철, 오 명 도*

서울시립대학교 대학원 기계정보공학과, 서울시립대학교 기계정보공학과*

Comparison of the PMV and CO₂ concentration Characteristic in the
Lecture Room with a Different Airflow rate of the Ventilation System and
Heating System for heating season

Chang-Woo Han, Kwang-Chul Noh and Myung-Do Oh*

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: In this paper, we performed the experimental and numerical study on the thermal comfort(TC) and indoor air quality(IAQ) in the lecture room with a different airflow rate of the ventilation system and heating system for heating season. Through the experimental results, we found out that there was considerably difference of the PMV but there was little difference of CO₂ concentration with a different heating system. From a numerical results, the best operating condition was that discharge airflow rate of SAC is 29 CMM and supply airflow rate of the ventilation system is 1,200 CMH from a viewpoint of TC and IAQ.

Key words: Predicted mean vote(예상온열감), Carbon dioxide concentration(이산화탄소 농도), System air-conditioner(시스템에어컨), Fan coil unit(팬코일유닛), Ventilation system(환기시스템), Airflow rate(풍량)

기 호 설 명

PMV: 예상온열감

1. 서 론

국내에서는 재실자에게 쾌적한 온열환경을 제공하기 위하여 냉난방 시스템이 운전되는 공간에

서 열쾌적도 평가에 관한 연구를 수행하였다.⁽¹⁾ 냉난방 시스템 운전시 에너지 절약을 위하여 실내 환기량을 감소시킴으로서 밀폐된 공간에서 발생한 오염물질이 실외로 원활히 배출되지 않아 빌딩증후군(sick building syndrome, SBS)과 같은 질병이 재실자의 건강을 위협하고 있다. 그리고 현대인들의 생활수준 향상에 따라 실내공기질(indoor air quality, IAQ)에 대한 관심이 증가되고 있다. 이와 같은 배경으로부터 국내에서는 재실자에게 쾌적한 환경을 제공하기 위하여 온열환경과 공기질환경을 함께 고려하여 실내 환경을 제어하는 연구가 수행되고 있다.⁽²⁾⁻⁽³⁾

†Corresponding author

Tel.: +82-2-2210-2756; fax: +82-2-2210-5110

E-mail address: mdoh@uos.ac.kr

본 연구는 하절기 냉방시스템의 개별 작동에 따른 온열환경 및 공기질환경 평가에 관한 연구의 연장으로서 동절기 환기시스템이 설치된 대학교 강의실에서 시스템에어컨과 팬코일유닛의 개별 작동에 따라 재실영역에서 온열환경 및 공기질환경의 특성을 비교하는 연구를 실험적·수치적 방법을 사용하여 수행하였다.

2. 연구모델

2.1 강의실 및 환기시스템

Fig. 1은 본 연구가 수행된 강의실의 개념도로써 실내 공조를 위하여 시스템에어컨(system air-conditioner, 이하 SAC라 칭함)과 팬코일유닛(fan coil unit, 이하 FCU라 칭함)이 설치되어 있고, 외부의 신선공기 도입을 위하여 환기시스템이 설치되어 있다. 강의실의 크기는 6.6 m(W) × 2.4 m(H) × 11.2 m(L)이고, 체적은 177 m³이다. 급기구는 Fig. 1에서와 같이 SAC를 중심으로 대각선 방향에 4개를 설치하여 신선공기의 실내 분배성능을 우수하게 하였고, 배기구는 재실자에 의해 오염된 공기와 칠판에서 발생하는 분진을 효과적으로 배출시키기 위하여 강의실 앞쪽과 뒤쪽에 각각 2개씩 설치하였다. 강의실 내 재실인원은 30명이고, 피실험자의 대부분은 강의실 앞부분에 정좌해 있다.

2.2 시스템에어컨과 팬코일유닛

강의실에는 실내 공조를 위하여 중앙에는 천정형 4-way 시스템에어컨 1대가 설치되어 있다. SAC의 온기토출은 4방향으로 되어 있고, 최대풍량은 29 CMM으로 강의실의 폭과 길이의 비에 관계없이 동일한 풍량의 온기가 토출된다. 본 연구에서는 토출각을 30°로 고정하였는데, 이는 선행연구에서 SAC의 토출각이 천장면에 대하여 30° 이상인 경우 재실자에게 열적 불쾌감을 일으킬 수 있다고 언급했기 때문이다. FCU는 창문을 통하여 들어오는 부하를 제거하기 위하여 강의실 창문 아래에 3대가 설치되어 있다. FCU 1대의 최대풍량은 9.67 CMM이고, 교실바닥면에 대하여 45°의 각도로 냉기가 토출된다.

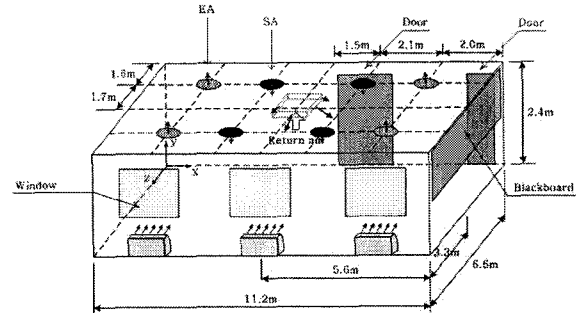


Fig. 1 Schematic design of the lecture room.

3. 평가지표

3.1 예상온열감(PMV)

예상온열감(predicted mean vote, 이하 PMV라 칭함)은 인간의 온열환경에 대한 반응을 정량화시킨 것으로 인체의 대사율, 의복의 열저항치 등과 건구온도, 평균복사온도, 기류, 습도 등을 종합적으로 고려하여 인체가 느끼는 열쾌적성을 이론적으로 나타낸 것이다. PMV는 식(1)을 사용하여 계산되고 7단계로 온열감을 구분한다. ISO Standard 7730에서는 재실자를 만족시키는 쾌적 범위를 -0.5~0.5로 규정하고 있다.

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}] \quad (1)$$

여기서, M 은 인체의 신진대사율, W 는 외부로 행하는 일, H 는 현열을 통한 열손실, E_c 는 피부를 통한 증발 열전달, C_{res} 는 호흡을 통한 대류 열전달, E_{res} 는 호흡을 통한 증발 열전달을 각각 나타낸다. 본 연구에서 PMV 계산시 사용된 인체의 신진대사량은 일반적인 정좌 상태 1.2 met (69.84 W/m²)을 적용하였고, 착의 상태는 겨울철 평상복 차림으로 가정하여 1.0 clo(0.155 m²K/W)를 사용하였다.

3.2 이산화탄소

이산화탄소(carbon dioxide, CO₂)는 무색, 무미, 무취의 기체로 일반적으로 대기 중에 0.04% 정도 포함되어 있으며, 최근 지구온난화 가스로 주목

Table 1 Measurement condition.

Category		SAC	FCU
Outdoor	Temperature	4.6°C	6.1°C
	CO ₂ conc.	380 ppm	400 ppm
Heating system	Airflow rate	29 CMM	
	Temperature	42°C	50°C
Ventilation system	Airflow rate	800 CMH	
	Temperature	22.86°C	23.26°C

받고 있으나 대기오염물질로 분류되지 않고 있다. 실내 CO₂ 농도가 0.1% 또는 0.15% 이상이 되면 그 실내의 환기는 불량한 것으로 평가하고 있다. 이는 CO₂ 자체의 영향보다는 CO₂가 증가하는 환기불량 상태가 실내에서는 체열발산에 의한 온도나 습도의 증가, 분진, 세균 등도 불량한 상태로 되는 경우가 많다고 알려져 있기 때문에 CO₂ 농도가 실내의 환기상태를 평가하는 지표로서 사용되고 있다. 우리나라의 경우 오염물질 발생량을 정량적으로 평가할 수 있는 물질이 CO₂로 제한된 경우(종합지표) 1,000 ppm, 오염물질 발생량을 유지기준에 제시된 모든 물질에 대하여 정량적으로 평가할 수 있는 경우(단독지표) 3,500 ppm으로 제한하고 있다.

4. 실험 및 수치해석

4.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 환기시스템이 설치된 강의실에서 SAC와 FCU 개별 가동 시 PMV와 CO₂ 농도를 측정하였다. 측정실험은 Table 1에 나타난 조건의 상태에서 수행되었다. 측정실험 시 PMV의 경우 Innova사의 Model 1221을 사용하였고, CO₂의 농도는 Gray-wolf사의 IAQ-410을 사용하여 측정하였다.

실내 측정실험은 재실자의 착석 시 호흡선 높이인 1.1 m의 단면에서 13개의 위치를 선정하여 이루어졌고, 각각의 측정위치는 Fig. 2에 자세히 표시되어 있다. 환기시스템 미가동 시 Pt. (13)에서 시간에 따른 PMV와 CO₂ 농도 변화를 측정하였고, 환기시스템 가동 시에는 Pt. (13)에서 실내 기류분포가 안정화된 이후에 측정센서의 위치를 이동시켜 가면서 샘플링 하였다. 각 측정점에서

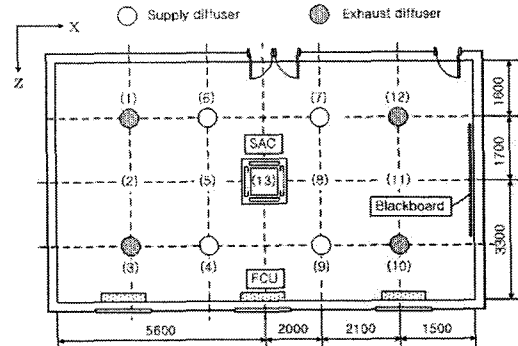


Fig. 2 Measuring points in the lecture room.

5분간 PMV와 CO₂ 농도를 측정하여 이들의 평균값으로 결과를 나타냈다.

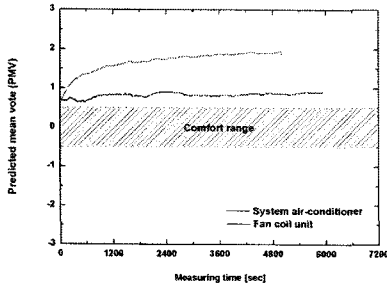
4.2 수치해석방법

수치적인 방법을 사용하여 PMV와 CO₂ 농도를 평가하기 위하여 상용 CFD 코드인 STAR-CD를 사용하였고, 정상상태의 속도장, 온도장을 얻기 위하여 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 강의실 내에서 발생한 난류유동을 계산하기 위하여 실내 유동해석에서 많이 사용되고 있는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 재실자에 의해 발생하는 CO₂는 농도방정식의 생성항에 포함시켰고, 그 외에 수치해석 시 사용한 경계조건 및 제어변수는 Table 2에 나와 있다.

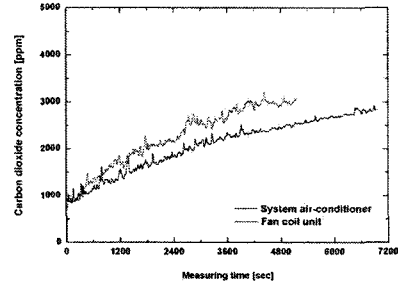
수치해석 시 수렴판정 조건으로는 강의실 중앙에서의 운동량으로 정규화한 각 격자에서 운동량 방정식, 에너지방정식, 난류운동에너지 방정식, 난류운동에너지 소산율 방정식 유수의 합이 10^{-3} 이하, 농도방정식 유수의 합이 10^{-6} 이하일 때로 정

Table 2 Boundary condition and control variables.

Category		Input data
Outdoor	Temperature	-7°C
	CO ₂ conc.	400 ppm
Heating system	Airflow rate	20, 23, 26, 29 CMM
	Temperature	42°C
Ventilation system	Airflow rate	800, 1000, 1200, 1400 CMH
	Temperature	17.8°C

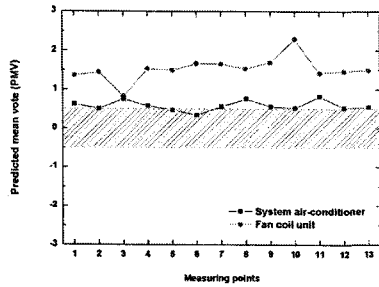


(a) Predicted mean vote

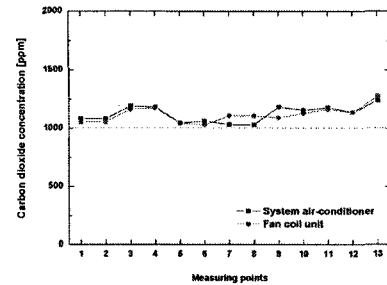


(b) Carbon dioxide concentration

Fig. 3 Variation of the PMV and CO₂ concentration without ventilation system.



(a) Predicted mean vote



(b) Carbon dioxide concentration

Fig. 4 Distribution of the PMV and CO₂ concentration with a different heating system at measuring points.

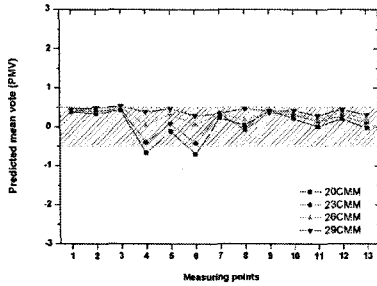
하였다. 실제 계산에서는 수렴조건을 만족하기 위하여 약 5,000회의 반복 계산이 수행되었다.

5. 측정 결과 및 고찰

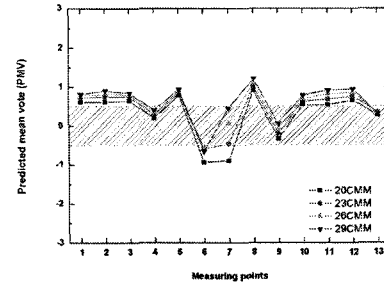
Fig. 3은 환기시스템 미가동시 SAC와 FCU가 개별 가동되는 조건하에서 강의실 중앙에 위치한 Pt. (13)에서 시간 변화에 따라 PMV와 CO₂의 농도 변화를 측정하였다. Fig. 3(a)을 살펴보면 측정 초기에는 강의실과 외부 기후 조건의 차이로 PMV의 경향성 차이가 관찰되었다. 이 조건하에서는 환기시스템을 통한 외기 부하가 실내로 유입되지 않아 SAC와 FCU 모두 PMV가 쾌적범위를 초과하는 것으로 나타났다. Fig. 3(b)에서 측정 초기에는 난방시스템에 따라 CO₂의 농도 증가율이 차이가 있는 것으로 나타났다. SAC와 FCU 모두 측정시간이 경과함에 따라 CO₂의 농도는 지속적으로 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 4는 환기시스템 가동되는 조건하에서 SAC와 FCU 개별 가동 시 13개의 측정점에서 PMV와 CO₂의 농도 측정 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)에서 SAC 가동 시 대부분의 측정점에서 PMV는 쾌적범위의 상한선인 0.5를 약간 초과한 것으로 나타났지만 FCU 가동 시에는 평균 1.5 정도로 높게 나타났다. FCU 가동 시 FCU에서 가까운 측정점인 Pts. (3)과 (10)에서는 강의실 앞부분과 뒷부분에서 대칭인 위치임에도 불구하고 PMV가 상반된 값을 보이는데, 이는 Pt. (10)보다 Pt. (3) 부근으로 토출되는 온기풍량이 적고, 천장에 설치된 배기구를 통한 배기풍량이 많기 때문으로 판단된다. Fig. 4(b)에서 난방시스템의 종류에 관계없이 13개의 측정점에 대한 평균 CO₂의 농도는 1,100 ppm 정도로 나타났고, 강의실 앞쪽으로 갈수록 재실자 호흡에 의한 영향으로 CO₂의 농도가 높아짐을 알 수 있었다.

6. 수치해석 결과 및 고찰

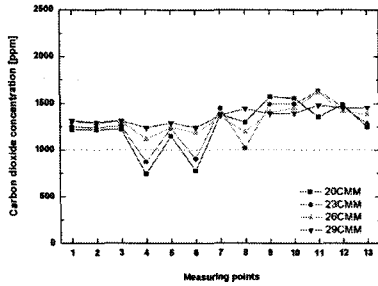


(a) When SAC is operated

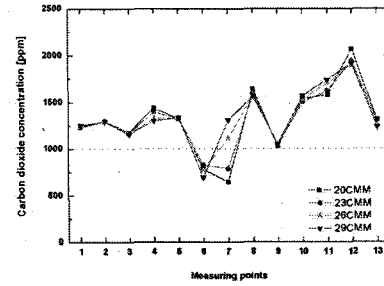


(b) When FCU is operated

Fig. 5 Predicted mean vote with a different discharge airflow rate of air-conditioning system.



(a) When SAC is operated



(b) When FCU is operated

Fig. 6 CO₂ concentration with a different discharge airflow rate of air-conditioning system.

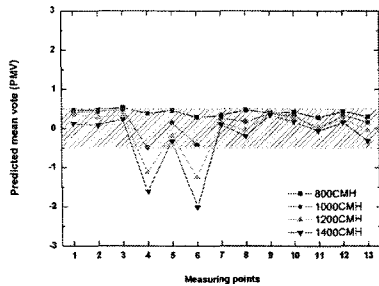
6.1 난방시스템의 토출풍량 변화

Figs. 5와 6은 환기시스템의 급기풍량이 800 CMH인 조건하에서 난방시스템의 토출풍량 변화에 따라 13개의 측정점에서 PMV와 CO₂의 농도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 SAC 가동 시 온기 토출풍량이 증가할수록 PMV의 편차가 작아지는 것은 급기구를 통하여 실내로 유입되는 저온의 외기가 SAC에서 토출된 온기에 유입되어 급기구 하부 영역으로 바로 유입되는 양이 감소하였기 때문으로 판단된다. FCU 가동 시 실내로 토출된 온기는 부력의 효과로 강의실 상부 영역으로 바로 유입되어 실내 공기의 혼합효과가 SAC보다 상대적으로 작기 때문에 지역적인 편차가 크게 나타났다. Fig. 6에서 SAC 가동 시 토출풍량이 증가할수록 SAC에 의한 신선외기의 실내 분배가 원활히 이루어지기 때문에 CO₂의 지역적인 편차가 작아지는 것으로 나타났다.

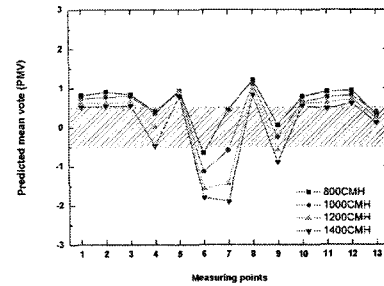
6.2 환기시스템의 급기풍량 변화

Figs. 7과 8은 난방시스템의 토출풍량을 29 CMM으로 설정하고, 환기시스템의 급기풍량 변화에 따라 13개의 측정점에서 PMV와 CO₂의 농도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)을 살펴보면 Fig. 5(a)의 경우와 마찬가지로 환기시스템의 급기풍량 변화에 따라 채실자가 없는 급기구 하부 영역(Pts. (4)와 (6))에서 PMV의 변화폭이 큰 것으로 나타났다. Fig. 7(b)를 살펴보면 FCU에서 멀리 떨어져 있는 Pt. (7)은 실내 공기의 혼합효과가 상대적으로 작은 영역에 속하기 때문에 환기시스템의 급기풍량 변화에 따라 PMV의 변화폭이 가장 큰 것으로 나타났다. Fig. 8에서 SAC 가동 시 급기구를 통하여 국부적으로 유입되는 신선공기의 영향으로 급기풍량이 증가할수록 CO₂ 농도의 지역적인 편차가 커지는 것으로 나타났고, FCU는 강의실 한쪽으로 편중된 설치위치 때문에 SAC보다 CO₂ 농도의 지역적인 편차가 큰 것을 알 수 있었다.

7. 결론

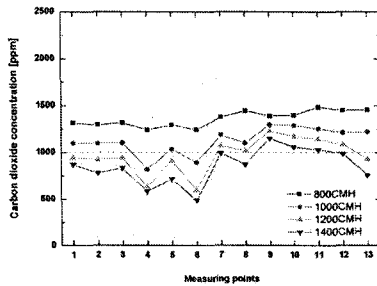


(a) When SAC is operated

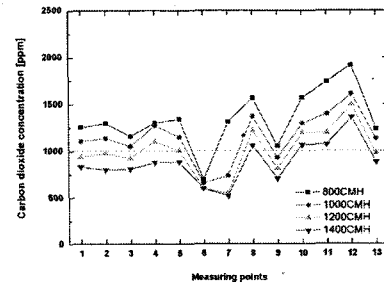


(b) When FCU is operated

Fig. 7 Predicted mean vote with a different supply airflow rate of the ventilation system.



(a) When SAC is operated



(b) When FCU is operated

Fig. 8 CO₂ concentration with a different supply airflow rate of the ventilation system.

본 연구에서는 동절기 환기시스템이 장착된 강의실에서 난방시스템과 환기시스템의 풍량 변화에 따라 온열환경 및 공기질환경의 특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 측정실험을 통하여 환기시스템 가동 시 난방시스템의 변화에 따라 13개의 측정점에서 측정된 CO₂의 농도차는 크지 않은 것으로 나타났지만 PMV는 난방시스템의 제어방식 차이로 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다.

(2) 수치해석 결과에 따르면 PMV와 CO₂의 농도 변화는 난방시스템의 토출풍량 변화보다 환기시스템의 급기풍량 변화에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

(3) SAC 가동 시 온기 토출풍량이 29 CMM, 환기시스템의 급기풍량이 1,200 CMH인 작동조건 하에서 열쾌적도와 실내공기질이 걱정 수준을 모두 만족하는 가장 우수한 상태로 평가되었다.

참고문헌

1. Noh. K. C. and Oh. M. D., 2004, A Study on the Comparison of Thermal Comfort Performance Indices for Cooling Loads in the Classroom, Proceedings of the KSME 2004 Spring Annual Conference, pp. 2465-2470.
2. Han. C. W., Noh. K. C., Oh. M. D., 2005, Evaluation of Thermal Comfort and Ventilation Performance in the Lecture Room with Ventilation System and Two Different Air-conditioning System: System Air-conditioner or Fan Coil Unit, Journal of SAREK, Vol. 17, No. 11, pp. 1079-1087.
3. Noh. K. C., Jang. J. S., Oh. M. D., 2006, Study on Thermal Comfort and Indoor Air Quality in the Classroom with System Air-conditioner and Ventilation System for Cooling Loads, Journal of KSME, Vol. 30, No. 1, pp. 57-66.