



## 도서관 전열교환기의 재실자수에 따른 기준 환기량 산정 및 수요기반제어

### *A Suggestion of Ventilation Requirements and Demand Controlled Ventilation for Energy Recovery Ventilator based on Number of Occupants in a Library, and its Pilot Tests*

윤정욱\* · 김선혜\*\*

Jung-Wook Yoon\* · Sean-Hay Kim\*\*

\* Graduate School of Housing and Urban Planning, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea (scoco337@hufs.ac.kr)

\*\* Corresponding author, School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea (seanhay.kim@seoultech.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** Although ERV (Energy Recovery Ventilator) is operating during open hours all the time, students tend to be least satisfied with the indoor air quality of library. This discomfort is getting apparently observed while more students have seated longer time. This study aims to measure whether the supplied airflow rate per capita is sufficient against the law-enforced CO<sub>2</sub> concentration - 1,500 ppm in an actual university library. Also this study aims to perform a pilot test of the DCV (Demand Controlled Ventilation) based on number of occupants, as a compensation for the increased airflow rate that could be a recommended reaction after through measuring currently supplied airflow rates. **Method:** We first have fixed the supplied airflow rates while letting go off entering and leaving students as many as the number of students who usually visit the library, and then measured the marginal number of students at each flowrate, which makes CO<sub>2</sub> concentration under 1,500 ppm. Also we have fixed the 35 students and then measured the desired airflow rate that maintain CO<sub>2</sub> concentration under 1,500 ppm. Lastly, we have tested the occupant-based DCV for the ERV following combinations of the marginal number of students and the desired airflow rates. **Result:** It is observed that 1) more occupants require larger airflow rates, as expected. It should be noted that when occupants more than a certain number stay in the library, CO<sub>2</sub> concentration is increasing faster than it would do when there is smaller number of occupants; 2) when library is pretty much occupied, the law-enforced ventilation rate per capita may not be sufficient to meet CO<sub>2</sub> concentration under 1,500 ppm; 3) the occupant-based DCV well contains CO<sub>2</sub> concentration under 1,500 ppm upon varied number of occupants, while saving surplus airflow volumes and thus saving the electricity.

© 2019 KIEAE Journal

#### KEYWORD

전열교환기  
도서관  
기준 환기량  
수요기반환기제어Energy Recovery Ventilator  
Library  
Ventilation Requirement  
Demand Controlled Ventilation

#### ACCEPTANCE INFO

Received Mar 31, 2019  
Final revision received Apr 9, 2019  
Accepted Apr 12, 2019

## 1. 연구의 배경 및 목적

교실이나 도서관 같은 학교 시설의 경우, 재실자들이 장시간 머무르며 1인당 점유면적 또한 일반 사무소에 비해 비교적 적기 때문에 실내 공기질은 재실자의 건강 및 학습능률에 크게 영향을 준다. 따라서 현행 학교보건법은 이산화탄소, 미세먼지, 포름알데이드, 총 부유세균 등의 오염물질에 대한 학교 건물 안에서의 공기의 질에 대한 유지·관리기준을 명시하고 있고 있다[1]. 또한 동법은 환기용 창 등을 수시로 개방하거나 기계식 환기설비를 수시로 가동하여 1인당 환기량이 시간당 21.6세제곱미터 (21.6 CMH/person) 이상이 되도록 규정하고 있으며, 학교 건물 안에서의 공기의 질의 유지기준을 충족할 수 있도록 충분한 외부공기를 유입하고 내부공기를 배출할 수 있는 용량의 환기 설비를 설치하도록 하고 있다. 특히 교실의 경우 이산화탄소는 1,000 ppm 이하로 유지하게 명시하고 있으나, 전열교환기 같은 환기 설비가 설치되어 있는 경우 1,500 ppm까지 허용하고 있다.

그러나 이러한 규정에도 불구하고 대학 도서관은 재실자들이 개방시간 내내 머무르고 거의 만석으로 차 있는 경우가 많아 실내 공기 질에 재실자들의 불만과 환기에 대한 불안과 불신이 점점 커지고 있는 상황이다. 예를 들어 일반 교실을 대상으로 한 공기질 실측 실험에 따르면[2] 일반 교실의 적정 최대인원은 35명이며, 이때의 필요 환기용량은 800 CMH, 즉 1인당 22.8 CMH이었다. 따라서 본 연구에서는 대학 도서관의 환기량 기준의 적정성 여부를 환기량과 재실인원을 변화시켜 분석하고 1인당 적정 환기량 산정에 가장 큰 영향을 미치는 이산화탄소 농도를 실측하여, 적정 환기량에 대한 근거를 제공하고자 한다.

또한 현재 환기를 담당하는 전열교환기는 재실자 수에 관계없이 정풍량 운전을 하도록 설정되어 있어 재실자 수에 따른 적정 환기량을 공급하는 변풍량 운전, 즉 수요기반제어의 가능성도 실험적으로 검증해 보고자 한다. 기존의 수요기반제어는 이산화탄소 센서를 설치하여 센서가 제공하는 이산화탄소 농도에 따라 급기팬의 회전수를 제어하는 방법을 채택하고 있으나, 기축 도서관의 경우 이산화탄소 센서를 설치하고 인버터 모터가 설치된 전열교환기로 교체하는 것이 쉽지 않다. 반면 도서관에는 입출입자 검색 장비가 설치되어 있

거나 CCTV가 달려있어 재실자수를 보다 쉽게 파악할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 물리적인 재실 센서나 재실자 인식 기술을 사용하여 재실자 수를 파악하고, 기존 전열교환기의 풍량 모드를 전환하여 재실자수에 적합한 풍량을 공급하면서 동시에 쾌적한 실내 공기를 유지하고 반송전력량을 줄일 수 있는 전열교환기 운영 방식을 테스트해 보고자 한다. 또한 본 연구는 기존에 설치된 전열교환기의 풍량 모드 전환을 이용한 단계적 가변풍량으로도 이산화탄소 농도 제어가 가능한지를 실제 도서관에서 파일럿 테스트를 진행하여 타당성 조사를 하는데 목적이 있다.

## 2. 재실자 밀집공간의 국내 실내 공기질 기준

도서관에는 학교보건법에서 명시하는 ‘교실’의 공기 질에 관한 유지·관리 기준이 적용되고 있다(Table 1). 그러나 동법에 근거하면 전열교환기나 공기조화기가 교실에 설치되어 있으면 이산화탄소의 허용 농도를 1,500ppm까지 완화해 주고 있고, 빈번한 미세먼지 정보 등 외부환경의 악화 때문에 기계 환기에 대한 교실의 의존도는 점점 높아지고 있다.

계다가 동법은 재실자 1인당 환기량이 21.6 CMH 이상이 되도록 할 것을 규정하고 있기 때문에, 실 당 최대 (설계) 재실자수와 1인당 환기량의 곱이 실무적으로 환기설비용량 산정에 사용되고 있다. 그러나 환기 설비가 최대 출력으로 가동되고 있음에도 불구하고 실측 이산화탄소 농도가 1,500 ppm을 상회하는 경우가 빈번히 관찰되고 있어, 재실자수에 따른 수요기반제어로 환기장치를 운전할 경우 학교보건법은 만족하겠지만 여유 없는 환기량로 인해 재실자의 만족도나 쾌적성은 다소 떨어질 가능성이 농후하다.

Table 1. The minimum IAQ pollutants for classrooms enforced by the School Health Act[1]

Pollutants	Minimum requirement
Particulate Matter (PM10)	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
CO	10 ppm (with individual heating system and/or for roadside classrooms)
CO <sub>2</sub>	1000 ppm (1,500ppm with mechanical ventilation)
NO <sub>2</sub>	0.05 ppm (with individual heating system and/or for roadside classrooms)
Formaldehyde (HCHO)	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Microbial colony	800 CFU/ $\text{m}^3$
Radon	4.0 pCi/L (for basements)
VOCS	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (for less than 3 year old schools)
Asbestos	0.01/cc
Ozone (O <sub>3</sub> )	0.06 ppm (for offices)
Mites	100 count/ $\text{m}^3$
Air-borne bacteria	10 CFU/room (for health rooms and restaurants)

## 3. 환기량과 재실인원 변동에 따른 이산화탄소 농도 변화

### 3.1. 실험대상 및 측정 방법

서울에 위치한 A대학교 건물의 2층에 위치한 전자도서관 (면적: 159.02 $\text{m}^2$ , 체적: 429.3 $\text{m}^3$ , 수용인원: 50명, 전열교환기[3]: 정격 풍량 1000 CMH)의 개방시간 동안 (8:00-19:00) 전열교환기의 환기량과 재실자 인원에 따른 이산화탄소 농도를 GRAPHTEC GS-CO2로[4] 측정하였다.

측정기기는 디퓨저 하단을 피해 도서관 중앙의 1.8m 높이에 배치하였으며(Fig. 1). 재실자 낱숨의 영향을 덜 받도록 측정기간 동안에는 센서 주위에 재실자 착석을 금지시켰다. 전열교환기의 풍량 모드는 대/중/소로 설정하였으며, TSI AccuBalance 8371[5]로 실제 풍량을 측정하였을 때 실제 출력 풍량은 각 960, 760, 660 CMH이었다 (정격 풍량은 각 1000, 800, 700 CMH). 재실자는 0명에서 대상 도서관의 사실상 만석 기준인 45명까지 측정하였다. 재실자는 20대 남녀들로 도서관 내에서는 계속 착석하였다.

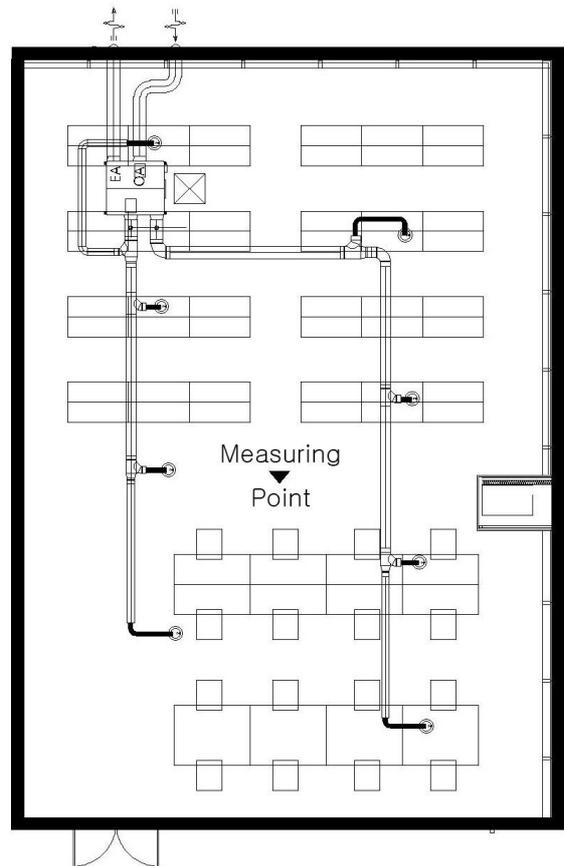


Fig. 1. Floorplan of the testbed library

### 3.2. 고정 환기량에 따른 이산화탄소 농도 변화

전열교환기의 환기량을 대/중/소/무가동으로 고정시켜 운전하였을 때 재실인원의 변동에 따른 이산화탄소의 농도를 측정하였다. 실험은 오전 8시부터 오후 6시 반까지 10시간 반 동안 실시하였으며, 이산화탄소 농도는 매 30초마다 재실자수는 매 30분마다 측정하

였다. 창문이나 문을 의도적으로 개방하는 자연환기는 실시하지 않았지만, 출입 및 퇴거로 인한 이산화탄소 농도의 변동 폭이 약간씩 관찰되었다.

Fig. 2.에서 Fig. 5.에서 알 수 있듯이 재실인원이 증가하면 도서관의 이산화탄소 농도도 증가하면서 두 변수간의 강한 인과관계를 관찰할 수 있었다. 특히 전열교환기가 무가동 상태일 때는 재실인원이 15-20명을 넘어서자 이산화탄소 농도는 선형 회귀식으로는 예측이 힘들만큼 급격히 증가하였다(Fig. 2.). 즉 이때는 침기나 출입문의 개폐 정도로 공급되는 (일정수준을 넘을 수 없는) 외기량으로는 다수의 재실자가 내뿜는 이산화탄소 증가량을 상쇄시킬 수 없음을 의미한다.

전열교환기의 현행 운전방식대로 환기량 960 CMH에 맞추어 운전할 때는 재실인원이 40명에 가까워지자 허용 농도인 1,500 ppm을 상회하는 경향을 관찰할 수 있었다(Fig. 5.). 그러나 현행보다 환기량을 줄여 660 또는 760 CMH로 운전할 때는 재실인원 30명 안팎에서도 이산화탄소 농도가 1,500 ppm을 상회하였다 (Fig. 3.과 Fig. 4.).

### 3.3. 고정 재실인원에 따른 이산화탄소 농도 변화

3.2절에서 전열교환기의 환기량이 660, 760, 960 CMH 일 때 재실인원이 각각 28, 32, 38명을 초과하면 이산화탄소 농도도 1,500 ppm을 상회하기 시작함을 회귀분석으로 추정할 수 있었다. 따라서 재실인원별 한계 환기량의 유효성 여부를 확인할 필요가 있다.

전열교환기 풍량을 660, 760, 960 CMH로 고정하고 재실인원을 각각 28, 32, 38명까지 증가시킨 다음, 이산화탄소 농도가 1,500 ppm을 초과하면 풍량을 잇 단계를 올려 이산화탄소 농도를 1,500 ppm까지 떨어뜨리고 다시 풍량을 재실인원별 한계풍량으로 고정하였다. 이를 반복하여 이산화탄소 농도가 1,500 ppm로 일정시간 유지되는 정상상태에 도달하였을 때, 전열교환기를 해당 풍량으로 1시간 더 운전하면서 이산화탄소 농도가 1,500 ppm 이하로 계속 유지될 수 있는지 1시간동안 30초 마다 측정하였다.

- 1) 재실인원을 28명으로 환기량을 660 CMH로 고정하고 (1인당 환기량 23.6 CMH) 1시간 동안 이산화탄소 농도를 측정하였을 때, 측정된 농도는 1,500 ppm 이하를 유지하였다(Fig. 6.).
- 2) 재실인원을 32명으로 환기량을 760 CMH로 고정하고 (1인당 환기량 23.8 CMH) 1시간 동안 이산화탄소 농도를 측정하였을 때, 측정된 농도는 1,500 ppm 이하를 유지하였다(Fig. 7.).
- 3) 재실인원을 38명으로 환기량을 960 CMH로 고정하고 (1인당 환기량 25.3 CMH) 1시간 동안 이산화탄소 농도를 측정하였을 때, 실험 시작 당시의 이산화탄소 농도는 약 1,500 ppm이었으나, 1시간 후 이산화탄소 농도는 약 1330 ppm 까지 떨어졌다(Fig. 8.). 즉 재실인원이 38명으로 고정되어 있을 때는 960 CMH (1인당 환기량 25.3 CMH)는 과풍량일 수 있다는 의미이다. 그러나 재실인원이 점점 늘어날 경우, 환기량 960 CMH로는 이산화탄소 허용 농도 이하를 만족하기 어렵기 때문에 더 많은 환기량이 필요함을 Fig. 5.의 회귀분석에서 예상할 수 있다.

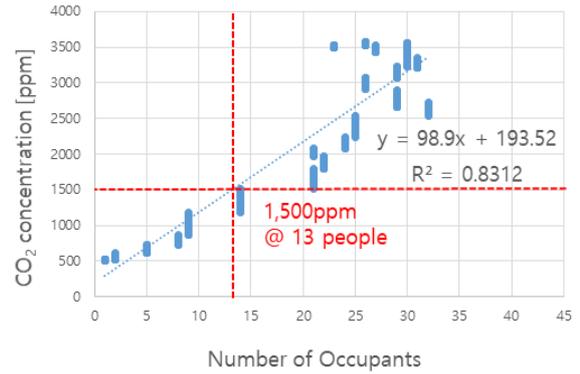


Fig. 2. ERV is off (Average outdoor CO<sub>2</sub> level is around 517 ppm on 2018/8/24)

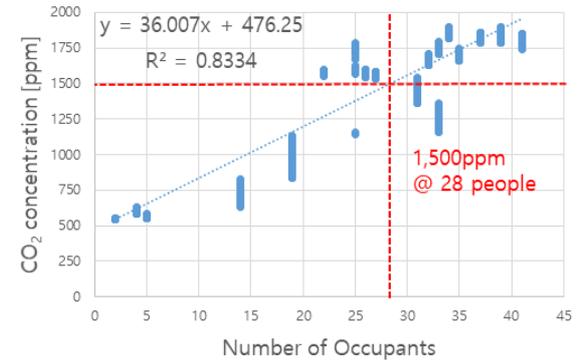


Fig 3. ERV supplies 660 CMH (Average outdoor CO<sub>2</sub> level is around 523 ppm on 2018/8/23).

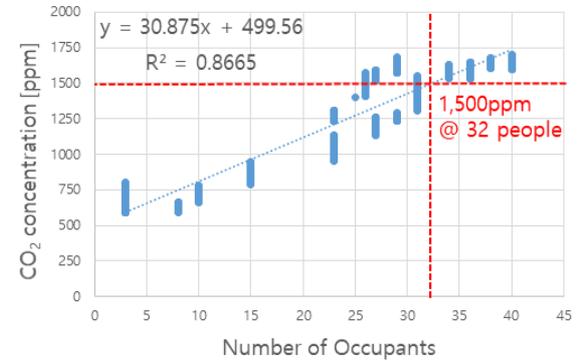


Fig. 4. ERV supplies 760 CMH (Average outdoor CO<sub>2</sub> level is around 516 ppm on 2018/8/22).

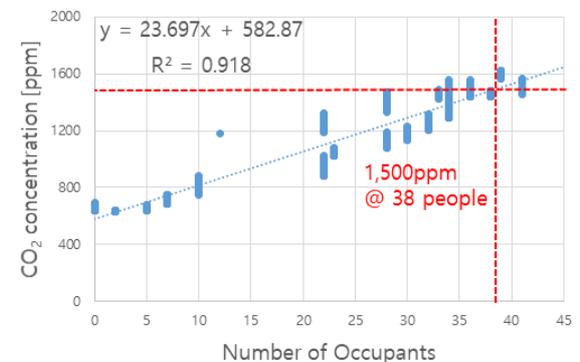


Fig. 5. ERV supplies 960 CMH at its normal operation (Average outdoor CO<sub>2</sub> level is around 530 ppm on 2018/8/21).

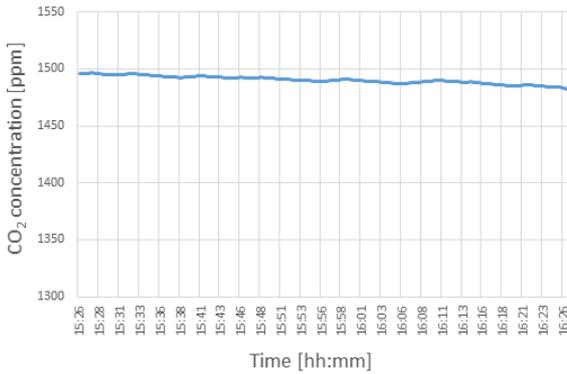


Fig. 6. 28 occupants in the library at 660 CMH of the supply air volume (Average outdoor CO<sub>2</sub> level is around 510 ppm on 2018/9/11).

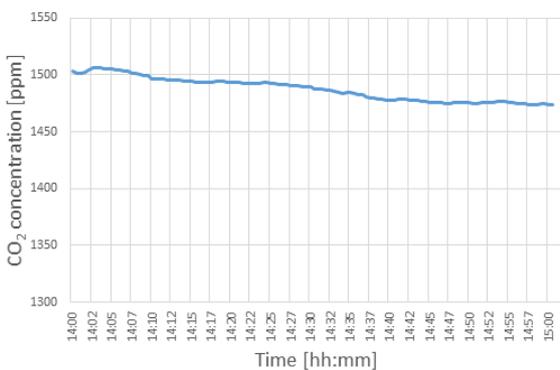


Fig. 7. 32 occupants in the library at 760 CMH of the supply air volume (Average outdoor CO<sub>2</sub> level is around 530 ppm on 2018/9/12).

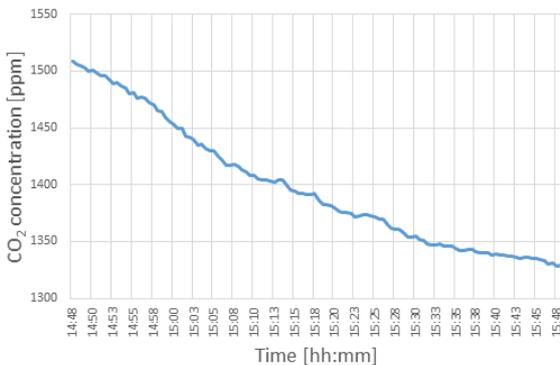


Fig. 8. 38 occupants in the library at 960 CMH of the supply air volume (Average outdoor CO<sub>2</sub> level is around 510 ppm on 2018/9/10).

### 3.4. 기준인원 35명을 대상으로 하였을 때 각 풍량 별 이산화탄소 농도 변화

3.1절과 3.2절의 실험에서 재실인원이 어느 규모 이상일 때에는 학교보건법에서 명시한 1인당 21.6 CMH의 환기량으로는 허용 이산화탄소 농도 조건을 만족하기 어렵다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 도서관 수용인원의 70% 수준인 재실자 수 35명 일 때, 이산화탄소 농도 조건을 만족하기 위한 적절한 풍량을 추정하기 위해 다시 실험을 실시하였다.

전열교환기 풍량을 760 CMH로 고정하고 재실인원을 35명까지 증가시킨 다음, 이산화탄소 농도가 1,500 ppm을 초과하면 풍량을 960 CMH로 올려 이산화탄소 농도를 1,500 ppm까지 떨어뜨리고 다시 풍량을 760 CMH로 고정하였다. 이를 반복하여 이산화탄소 농도가 1,500 ppm로 일정시간 유지되는 정상상태에 도달하였을 때, 전열교환기를 해당 풍량으로 1시간 더 운전하면서 이산화탄소 농도를 30초 마다 측정하였다(Fig. 9).

- 1) 500 CMH으로 전열교환기 풍량을 고정하였을 때 (1인당 14.3 CMH), 1시간 뒤 이산화탄소 농도는 약 2300 ppm까지 증가하였다. (외기 이산화탄소 평균 농도 520 ppm)
- 2) 760 CMH으로 전열교환기 풍량을 고정하였을 때 (1인당 21.7 CMH), 1시간 뒤 이산화탄소 농도는 약 1650 ppm까지 증가하였다. (외기 이산화탄소 평균 농도 514 ppm)
- 3) 960 CMH으로 전열교환기 풍량을 고정하였을 때 (1인당 27.4 CMH), 1시간 뒤 이산화탄소 농도는 약 1250 ppm까지 감소하였다. (외기 이산화탄소 평균 농도 541 ppm)
- 4) 이전 세 번의 실험으로 재실자가 35명 일 때는 825 CMH으로 전열교환기 풍량을 고정하면 (1인당 23.6 CMH), 1시간 뒤 이산화탄소 농도가 1,500 ppm으로 유지될 것을 계산하였다(Fig.9.). 이에 따라 전열교환기 풍량을 825 CMH로 고정하고 동일 실험을 실시하였을 때, 1시간 뒤 이산화탄소 농도는 약 1,500 ppm을 유지하였다. (외기 이산화탄소 평균 농도 504 ppm)

ASHRAE Standard 62.1-2016[6] 대학 교실의 환기량 기준에 따르면(식 1), 기준인원 35명에 대한 환기량은 181 L/s, 즉 650 CMH으로 계산된다. 외기 이산화탄소 농도를 평균 500 ppm이라 가정하였을 때, 도서관에서 1,500 ppm을 유지하기 위한 환기량은(식 2)에 의해 약 770 CMH로 계산된다.

$$\text{Ventilation rate [L/s]} = 3.8 \text{ L/s/person} \times \text{Number of occupants} + 0.3 \text{ L/s}\cdot\text{m}^2 \times \text{Area} \dots\dots\dots (\text{식 } 1)$$

$$\text{Ventilation rate [CMH] @ 1,500 ppm of CO}_2 = 0.022 \text{ CMH/person} \times \text{Number of occupants} \times 106 / (1,500 - \text{Outdoor CO}_2 \text{ concentration}) \text{ ppm} \dots\dots\dots (\text{식 } 2)$$

(식 1)과(식 2)에 따른 이론치보다 실제 필요 환기량이 더 큰 이유는 1) 실제 1인당 이산화탄소 발생량이 더 크거나 2) 센서의 위치 때문일 수 있다.

실무에서 이산화탄소 배출량에 따른 환기량을 계산할 때 아주 가벼운 작업에 대한 이산화탄소 발생량으로 1인당 0.022 CMH를 사용한다[7]. 그러나 앉아서 하는 작업에 대한 이산화탄소 발생량으로 1인당 0.028 CMH를 사용하기도 한다[7]. (식 2)에 재실자 35명, 환기량 825 CMH를 대입하면 1인당 이산화탄소 배출량은 0.0235 CMH로, 재실자가 착석해서 가벼운 사무를 보거나 작업을 할 때 배출하는 이산화탄소 발생량의 범위에 포함된다. 또한 재실자들이 신체 대사량이 가장 활발한 20대 청년들이고, 도서관에서의 활동레벨이 (Physical activity levels [M]) 1.4-1.6임을 감안하면 이 때 발생

하는 1인당 이산화탄소량은 0.02~0.023 CMH 정도이므로 [8], 본 실험에서 측정된 1인당 이산화탄소 발생량이 과다한 수치는 아닌 것으로 보인다.

환기량 제어를 위한 이산화탄소 센서는 주로 배기구에 설치되어, 결국 실내공기와 공급된 외기가 혼합된 상태에서의 이산화탄소 농도를 측정한다. 그러나 본 실험에서는 재실자와 상당히 근접한 1.8미터 높이에 센서가 설치되었기 때문에 배기구 기준의 이산화탄소 농도보다 센서 측정 이산화탄소 농도가 더 높을 가능성이 농후하다. 그러나 센서가 재실자의 날숨에 직접 영향을 받지 않도록 주위를 차단하고, 재실자가 실제 숨을 쉬는 공기층의 이산화탄소 농도를 측정했다는 측면에서 센서의 위치 오류로 보기에는 다소 어려움이 있다.

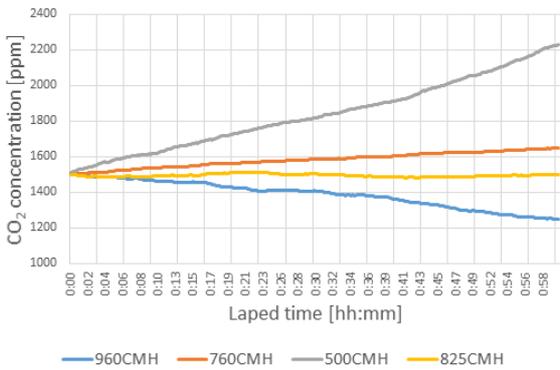


Fig. 9. CO<sub>2</sub> concentration one hour past after fixing the 35 occupants under varied supplied airflow rates

#### 4. 재실인원에 따른 전열교환기의 풍량 변화 시 이산화탄소 농도 변화

현행 전열교환기는 도서관의 개방시간 동안 풍량 960 CMH으로 (정격풍량은 1000 CMH) 재실자수에 관계없이 최대값 정풍량 운전으로 가동되고 있다. 3절의 실험에서 재실인원이 적을 때는 960 CMH의 풍량은 과할 수 있으며, 재실인원이 어느 수준을 넘어가면 1인당 21.6 CMH의 환기량이 허용 이산화탄소 농도를 만족하기에는 부족하다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 재실인원에 따른 전열교환기의 풍량을 조정하는 변풍량 운전이 (수요기반 환기제어: Demand Controlled Ventilation[8]) 이산화탄소의 농도를 비롯한 실내 공기질을 적절히 유지하면서도 팬 동력을 줄일 수 있기 때문에 보다 효율적인 도서관 전열교환기의 운전 방법으로 판단된다.

기존의 수요기반 환기제어는 이산화탄소 센서를 설치하고 실시간으로 이산화탄소 농도에 따라 환기장치의 풍량도 실시간으로 조정하는 방식을 사용하고 있지만, 본 연구에서는 재실인원 기반의 재실인원에 따른 전열교환기의 변풍량 운전의 가능성을 실험해 보고자 한다. 기존의 재실자 정보를 직접 추출하여 환기량을 조절하는 환기장치 및 제어와[10, 11] 본 연구의 수요기반제어는 재실자수를 이산화탄소 농도 등으로 추정하지 않고 재실센서와 화상인식을 활용하는 점에서는 동일하지만, 본 연구는 기존 전열교환기를 그대로 사용하되 전열교환기의 풍량 모드 전환을 제어변수로 사용한다는 점에 차별성이 있다.

따라서 3.1절에서 도출한 재실인원당 한계풍량에 따라 Table 2.

와 같이 전열교환기 풍량을 단계별 (대/중/소/무가동) 조정하였다. Fig. 10.은 2018년 9월 20일 오전 11시30분부터 오후 6시까지 6시간 30분 동안 재실인원을 11명에서 45명까지 증가시키며, 재실자수가 변할 때 마다 Table 2.에 따라 전열교환기의 풍량을 변화시키고 이산화탄소 농도를 30초마다 측정한 값이다.

Table 2. Varied supplied airflow rates upon number of occupants

# of occupants	Supplied airflow rate	Supplied airflow rate per capita
0 ≤ and ≤ 13	Off	0 CMH/person
13 < and ≤ 28	660 CMH (rated: 700 CMH)	50.8 - 23.6 CMH/person
28 < and ≤ 32	760 CMH (rated: 800 CMH)	27.1 - 23.8 CMH/person
More than 32	960 CMH (rated: 1000 CMH)	30.0 - 21.6 CMH /person

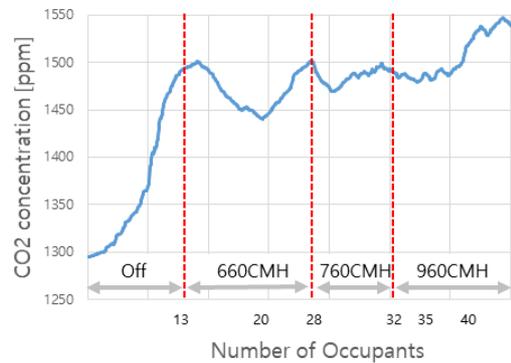


Fig. 10. CO<sub>2</sub> concentration at varied supplied airflow rates switched upon number of occupants according to Table 2. (Average outdoor CO<sub>2</sub> level is around 510 ppm on 2018/9/20)

- 1) 재실인원이 13명이 되기 전까지는 전열교환기를 가동하지 않았지만, 이산화탄소 농도는 1,500 ppm 이하를 계속 유지하였다.
- 2) 재실인원이 13명이 되어 전열교환기 풍량을 ‘소’로 (660 CMH) 설정하여 운전하였다. 재실인원이 늘어나면서 처음에는 관성때문에 이산화탄소 농도가 살짝 올라갔다 다시 감소하는 듯 하였지만, 재실인원이 20명을 넘어가기 시작하자 이산화탄소 농도가 증가하였다. 대체적으로 1,500 ppm 이하를 유지하였다.
- 3) 재실인원이 점점 늘어나 28명이 되자 전열교환기 풍량을 ‘중’으로 (760 CMH) 설정하여 운전하였다. 재실인원이 늘어나면서 처음에는 이산화탄소 농도가 감소하는 듯 하였지만, 재실인원이 30명에 가까워지자 이산화탄소 농도가 증가하였다. 1,500 ppm 보다 조금 낮은 수준에서 농도가 유지되었다.
- 4) 재실인원이 32명을 초과함에 따라 전열교환기 풍량을 ‘대’로 (960 CMH) 설정하여 운전하였다. 재실인원이 늘어나면서 처음에는 이산화탄소 농도가 감소하는 듯 하였지만, 재실인원이 35명에 가까워지자 이산화탄소 농도가 증가하기 시작하였다. 재실인원이 40명이 되기 전까지는 이산화탄소 농도가 1,500 ppm 이하를 유지하였지만, 40명을 초과하자 이산화탄소 농도 도 1,500 ppm을 초과하였다.

## 5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 학교 보건법에 명시된 도서관의 1인당 환기량 기준의 적정성 여부를 실제 대학 도서관의 환기량과 재실인원을 변화시켜 분석하고, 1인당 적정 환기량 산정에 가장 큰 영향을 미치는 이산화탄소 농도를 실측하여 적정 환기량 산정 근거를 실험하였다. 또한 쾌적한 실내 공기를 유지하면서도 전열교환기의 반송에너지를 줄일 수 있는 변풍량 운전에 대한 가능성을 실험하였다.

- 1) 전열교환기의 환기량을 대/중/소/무가동으로 고정시켜 운전하였을 때, 재실자수의 증감에 따라 이산화탄소 농도도 증감하는 강한 인과관계를 관찰할 수 있었다. 특히 전열교환기를 가동하지 않았을 때, 재실자수가 일정 규모를 넘어 증가할수록 이산화탄소 농도가 보다 빠르게 증가하는 추세를 관찰할 수 있었는데, 이는 재실자수가 많을수록 더 많은 1인당 환기량을 공급하여야 학교보건법에 명시된 허용 농도를 만족할 수 있음을 시사한다.
- 2) 도서관 수용인원의 70% 수준인 35명으로 재실자 수를 고정하였을 때, 전열교환기가 적어도 825 CMH 를 (1인당 23.6 CMH) 공급하여야 1시간 뒤에도 1,500 ppm 이하의 이산화탄소 농도를 유지할 수 있었다. 따라서 재실인원이 어느 규모 이상 초과하면 학교보건법에서 명시한 1인당 21.6 CMH의 환기량으로는 허용 이산화탄소 농도를 만족하기 어렵다는 사실을 알 수 있었다.
- 3) 각 풍량 별 한계 재실인원 수에 따라 전열교환기 풍량을 대/중/소/무가동의 단계별로 조정하여 변풍량 운전을 실시하였을 때, 재실인원이 40명을 초과하기 전까지는 (수용인원의 80%) 재실인원의 변동에도 불구하고 허용 이산화탄소 농도 이하를 만족함을 확인하였다. 따라서 재실인원에 따른 수요기반제어가 실내 공기질을 적절히 유지하면서도 팬 동력을 줄일 수 있는 효율적인 전열교환기의 운전 방법이 될 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 제안하는 기준 환기량 상향의 원인이 센서의 측정위치에 따라 가중된 이산화탄소 농도 (예, 센서가 재실자와 비교적 인접해 있거나 실내공기 순환이 원활하지 않을 때)나 재실자의 프로파일 (예, 나이, 성별, 신체크기, 대사량 등) 때문일 수도 있다. 그러나 재실자가 실제 숨 쉬는 공기층에, 재실자의 날숨이 직접적인 영향이 미치지 않도록 센서를 고정하고 외부환경변화가 그리 크지 않도록 연속적으로 며칠 동안 반복 실험을 실시하였고 20대 대학생들이 거주하는 '대학 도서관'이라는 점을 고려한다면, 본 연구 결과는 중고등 및 대학의 교육시설에 한하여 1인당 기준 환기량 조정의 기초자료로 이용될 수 있으리라 사료된다. 그러나 본 결과를 보다 객관화하기 위해서 다른 형상의 도서관, 다른 시간대, 보다 다양한 프로파일을 가진 재실자로 조건을 구성하고 다수의 실험을 반복적으로 수행하여야 할 것이다.

본 연구에서 제안한 대로 기준 환기량을 상향한다면 전열교환기의 용량이 증가할 수밖에 없고 따라서 팬 동력도 증가할 수밖에 없기 때문에 수요기반제어로 반송 에너지를 줄일 수 있는지 가능성을 타

진하고자 파일럿 테스트를 실시하였지만, 이산화탄소 농도가 아니라 재실자수에 기반한 풍량 제어이기 때문에 기존 도서관에 설치된 입출입자 검색 장치와 CCTV에서 실 재실자수를 계산하는 로직 개발이 우선적으로 필요하다. 더불어 인체에서 이산화탄소가 발생하고 실 전체에 확산하는 시간, 신선외기와 실내공기가 혼합되어 이산화탄소 농도가 줄어들기 시작하는 지연시간과 시간상수 등 보다 정밀한 제어를 위한 로직 개발이 필요하다. 또한 기존 정풍량 운전 대비 재실자수 기반의 수요기반제어로 얼마나 전열교환기의 운전시간과 총 공급 풍량을 줄일 수 있는지도 측정해야 하며, 이에 따른 절감 전력량 산정도 필수적이다.

## Acknowledgement

This study was supported by the Research Program funded by the Seoul National University of Science and Technology.

## Reference

- [1] 법무부, 학교보건법, <http://www.law.go.kr/법령/학교보건법>, 2019.3.1. // (Ministry of Justice, The School Health Act)
- [2] 신희수 외 8인, 2004, 학교 건물 환기시스템에 의한 교실내 공기질 측정 및 성능평가. 대한설비공학회 하계학술발표회 논문집, 713-716 // (Hee-Soo Shin et al., 2004, Indoor Air Quality Impact of Ventilation with the Existence of Occupants in Schools, SAREK Proceedings, pp.713-716)
- [3] LG electronics, ERV, <https://kr.lgeaircon.com>, 2019.3.1.
- [4] Graphtech, Petit LOGGER GL100, <http://www.graphteccorp.com/instruments/gl100/index.html>, 2019.3.1.
- [5] TSI, TSI Alnor 8371 AccuBalance Air Capture Hood, <https://www.instrumart.com/products/33783/tsi-alnor-8371-accubalance-air-capture-hood>, 2019.3.1.
- [6] ASHRAE, ASHRAE Standard 62.1-2016, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, 2016
- [7] ISO, ISO 16000-26:2012, Indoor air -- Part 26: Sampling strategy for carbon dioxide (CO2) Appendix A, 2012
- [8] Persily A., de Jonge L., Carbon dioxide generation rates for building occupants, Indoor Air, 2017, 27(5), pp.868-879
- [9] Murphy, J., Bradley, B., CO2-Based Demand-Controlled Ventilation With ASHRAE Standard 62.1, HPAC Engineering, 2008.
- [10] Sejong University, Smart Ventilation System and Method for Controlling Smart Ventilation, KR101204328B1, filed Nov. 30, 2011, issued Nov. 23, 2011.
- [11] Seoul National University, Smart Ventilation System and its Control, WO2017135628A1, filed Jan. 24, 2017, issued Oct. 10, 2017.