

## VAV/BPFS(Variable-Air-Volume/Bypass Filtration System)의 실내환경 적용에 관한 연구

최 성 우  
계명대학교 환경학부  
(2003년 9월 8일 접수; 2003년 12월 12일 채택)

### A Study on the Application of VAV/BPFS(Variable-Air- Volume /Bypass Filtration System) for Indoor Air Environment

Sung-Woo Choi

Faculty of Environmental Studies, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea  
(Manuscript received 8 September, 2003; accepted 12 December, 2003)

Under controlled conditions in an environmental chamber, 24 experiments were performed to compare the ability of a Variable-Air-Volume/Bypass Filtration System(VAV/BPFS) to remove indoor pollutants and to conserve energy with the ability of conventional Variable Air Volume(VAV) system. The specific conclusions of this paper were; first, the VAV/BPFS was more efficient than the VAV system in removing particulate matter, TVOC, and target VOCs. The total effective removal rate of PM for the VAV/BPFS was two times as high as that of the VAV system. The total effective removal rate of TVOC for the VAV/BPFS was 20 percent higher than that of the VAV system. Also each target VOC concentration was reduced by using the VAV/BPFS. Second, clean air delivery rate was increased by using VAV/BPFS due to additional filtration rate. Otherwise, the VAV/BPFS decreased outdoor supply air rate above 25 percent relative to the rate of VAV system. Third, total energy consumption by the VAV/BPFS was lower than that of the VAV system during the period with indoor thermal load, occupied time. The energy saving of the VAV/BPFS ranged from 11 to 16 percent. The VAV/BPFS improves indoor air quality more efficiently than the VAV system, and it reduced energy consumption. Retrofitting the VAV system with the VAV/BPFS was easy. The use of VAV/BPFS is, therefore, recommended for buildings with VAV system as well as for buildings at designing stage.

Key words : HVAC system, VAV system, VAV/BPFS, IAQ

#### 1. 서 론

실내환경의 밀폐화와 다양한 건축자재 및 부속물의 증가로 인해 실내공기오염물질의 종류가 다양화되고 농도가 증가함에 따라 인간에게 미치는 영향이 점차 증가되고 있는 실정이다<sup>1~3)</sup>. 실내공기질(IAQ; Indoor Air Quality)을 악화시키는 요인으로는 실내오염물질의 발생원, 외부유입공기중 오염물질농도, 인간의 활동도 및 환기율 등이 있으며 이들

요인을 제거, 개선하거나 환기율을 증가시킴으로써 청정 실내공기질을 유지할 수 있다고 보고하고 있다<sup>4~7)</sup>. ASHRAE<sup>8)</sup>는 실내공기질 관리를 위해선 환기시스템의 선택 및 유지관리가 매우 중요하다고 제시하였으며 적정 실내공기질은 적어도 80%이상의 사람이 불쾌감을 느끼지 않을 정도의 공기질이라고 정의하였다.

일반 실내환경의 적정 실내공기질을 유지하기 위해서' HVAC(Heating, Ventilating, and Air Conditioning) 시스템의 적절한 관리와 운전이 필요하다<sup>9,10)</sup>. HVAC 시스템은 일반적으로 CV(Constant Volume) 시스템과 VAV(Variable Air Volume) 시

Corresponding Author : Sung-Woo Choi, Faculty of Environmental Studies, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea  
Phone : +82-53-580-5245  
E-mail : swchoi@kmu.ac.kr

스템으로 분류할 수 있다. CV 시스템은 적정 실내 공기질 유지가 가능하나 에너지소비가 매우 크며, 반면에 VAV 시스템은 에너지소모량은 적으나 적정 실내공기질을 유지하지 못하는 단점을 가지고 있다<sup>11~13)</sup>. 본 연구에서 제안하는 VAV/BPFS(Variable-Air-Volume/Bypass Filtration System)는 VAV 시스템의 단점을 보완하여 에너지절감효과와 적정 실내공기질을 유지하기 위해 개발되었다<sup>14,15)</sup>.

본 연구에서는 VAV/BPFS를 사용하여 실내공기질과 에너지 개선 효과를 평가하고 실내공기질 모델링을 함으로써 향후 실내공기질 관리에 효과적인 제어방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 본 연구는 제한된 공간내에서 대표적인 실내오염물질인 PM(Particulate Matters)과 TVOC(Total Volatile Organic Compound) 및 일부 VOCs(Volatile Organic Compounds)의 제거효율을 평가하고 시스템의 에너지 소모량을 비교하였으며, 두 HVAC 시스템의 농도저감효율을 평가하기 위해 농도비에 따른 실내공기질 모델을 제안하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 실험재료 및 방법

VAV/BPFS의 IAQ 및 에너지 소모량 실험은 온도, 상대습도 및 공기순환율등을 조절할 수 있는 32.6m<sup>3</sup>의 알루미늄 실내공간에서 실시하였다. 실내 공간에 이미 설치된 HVAC 시스템의 구조 변경을 통하여 VAV/BPFS를 설치하였으며 기존 시스템과 비교하기 위해 기존시스템 모드와 VAV/BPFS모드를 선별적으로 선택하여 운전할 수 있도록 하였다. 또한 IAQ 실험을 위해서 실내공간 내부에 연기발생장치와 스프레이를 설치하여 PM과 VOC를 인위적으로 발생하였다. 실내공간내 오염물질의 배출량을

균일하게 하기 위해 연기발생장치와 스프레이 시간을 일정하게 작동하도록 하였다.

실내의 열량은 200 Watt의 전구를 설치하여 조절하였으며 200 Watt의 전구에서 발생하는 열량은 실내에 1인이 거주시 발생하는 열량과 동일시 된다<sup>10)</sup>. VAV/BPFS의 실험은 냉방모드를 중심으로 진행하였으며 시스템이 작동하기 위한 실내적정온도는 24 °C로 고정하였으며 상대습도는 55%를 유지하였다. 본 연구의 수행을 위해 에너지와 IAQ 실험은 120분 간격으로 동일조건하에서 열원별로 6회를 반복하여 24회 실시하였다. 열원은 실내에 2인, 4인, 6인, 9인에 의해 발생하는 열량을 모사하기 위해 200watts 전구를 각 2개, 4개, 6개, 9개를 사용하였다.

또한 실험 시작 전 대상오염물질의 배경농도 및 온도를 측정 후 10분 간격으로 PM, TVOC 및 온도와 시스템내로 유입되는 외부공기유입량은 마노미터를 이용하여 연속 측정하였으며 대상 VOCs 포집 후 냉동 보관하여 분석하였다. 10µm 미만의 미세분진을 연속 측정할 수 있는 Model Ram-1 real-time aerosol monitor(MIE)를 이용하여 PM을 분석하였으며, TVOC는 HNU Model PI101 trace gas analyzer(HNU system)를 사용하여 연속 측정하였고 대상 VOCs는 열탈착방법을 이용하여 GC/MS (HP Model 5890 Series II)로 분석하였다. 연속 측정장비는 실험 전후에 제로가스와 표준가스로 보정하였다.

### 2.2 VAV/BPFS의 제어방법

VAV/BPFS는 적정 실내공기질을 유지할 뿐만 아니라 에너지소모량을 최소화하기 위해 설계된 HVAC시스템이다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 VAV/BPFS의 개략도이다. 이 시스템은 쾌적한 실내 온도 및 습도를 유지하기 위해 SZM 3000 zone

Table 1. Comparison of operation sequences of VAV system and VAV/BPFS

STEP	Demand		VAV System	VAV/BPFS
	IAQ	Cooling		
1	NO	NO	No chilled water to cooling coil 12 inch filter damper closed 12 inch zone damper closed	No chilled water to cooling coil 12 inch filter damper closed 12 inch zone damper closed
2	YES	NO	No chilled water to cooling coil 12 inch filter damper closed 12 inch zone damper closed	NV1 open 12 inch filter damper opened Setpoint temperature is reduced to lower temperature to open the 12 inch zone damper
3	NO	YES	V1 open 12 inch filter damper closed 12 inch zone damper opened	V1 open 12 inch filter damper closed 12 inch zone damper opened
4	YES	YES	V1 open 12 inch filter damper closed 12 inch zone damper opened	NV1, V1 open 12 inch filter damper opened 12 inch zone damper opened

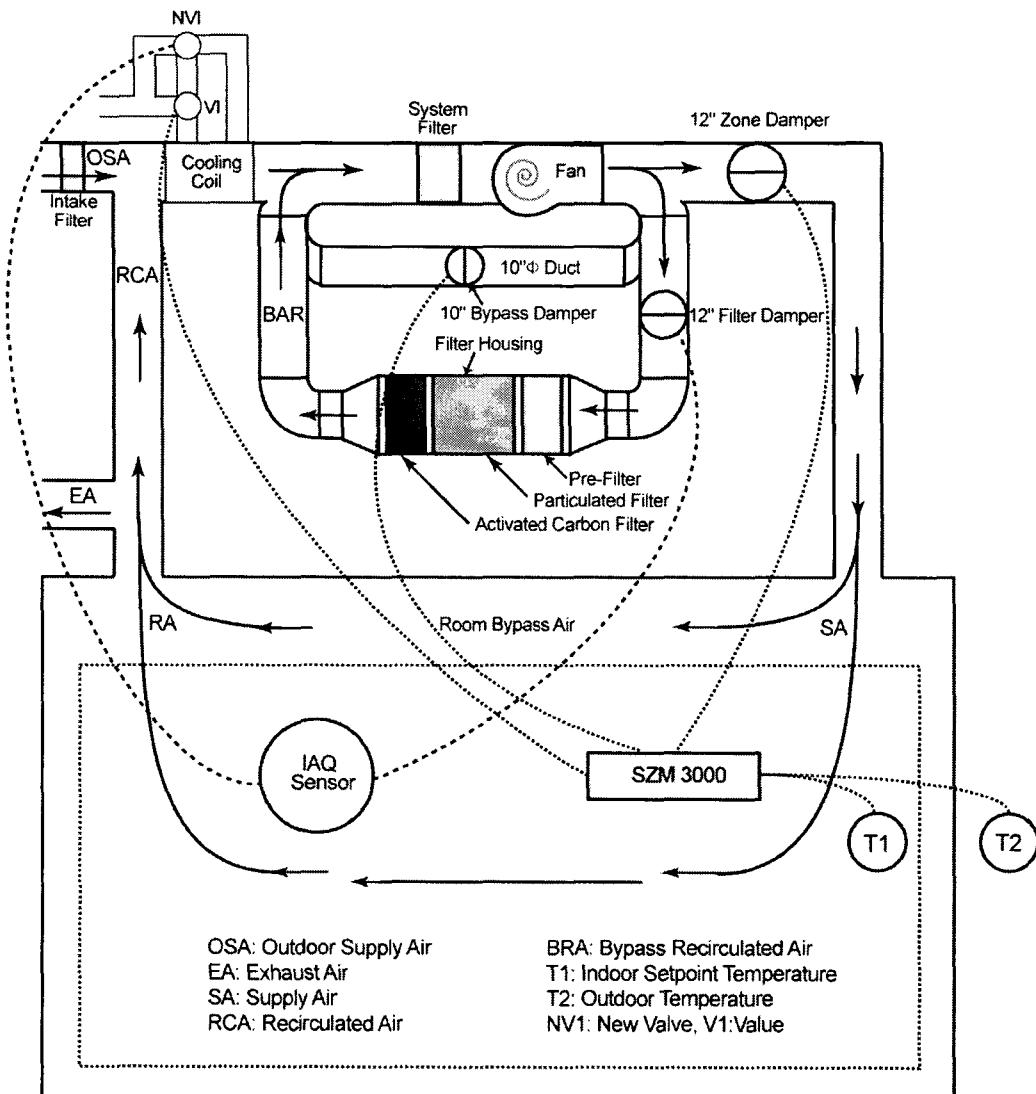


Fig. 1. Variable-air-volume/bypass filtration system with environmental chamber.

controller(Zone-all Control Systems Inc.)를 사용하였으며 적정 실내공기질 유지를 위해 IAQ sensor (Staefa Control Systems Inc.)를 사용하였다. IAQ sensor는 실내의 VOC농도를 감지하여 실내공기질이 특정 수치 이상이 되었을 경우 작동되도록 설계되어 있다. 따라서 VAV/BPFS시스템은 실내공기질이 정상인 경우에는 10 inch bypass damper로 우회하여 흐르게 되며 실내공기질이 오염되었을 경우 IAQ sensor는 10 inch bypass damper를 닫고 12 inch filter damper를 100% 열어 실내순환공기를 우회필터(Filter Housing)을 통과하게 함으로서 오염

물질을 정화하도록 설계하였다. 우회필터에는 PM을 제거하기 위한 고효율분진필터(Farr Company)와 VOCs제거를 위한 활성탄필터(Farr Company)를 장착하였다.

SZM3000은 실내외의 온도(T1, T2)를 감지하여 실내적정온도(T1)와 비교후 시스템의 작동여부를 결정하며 12 inch zone damper를 개폐하여 실내의 온습도를 조절할 수 있도록 설계하였다. 본 연구에서 이용한 실내공간은 실내공기오염 연구를 위해 특별히 제작된 공간으로 공간내의 온도, 습도를 조절 할 수 있도록 설계되었으며 공간내 공기의 혼합

을 위해 천장 표면에 균일한 구멍을 통해 기류가 바닥쪽으로 흐를 수 있도록 설계되어 있다. 또한 시스템간의 IAQ 비교를 위해 동일 측정위치에서 IAQ 농도를 측정하였으며 측정높이는 재설자의 호흡기 높이인 바닥위 1.2 m로 공간 중앙부에 설치하여 측정하였다.

두 시스템의 실내온도조절과 실내공기질의 변화에 따른 작동기전을 Table 1에 제시하였다. Table 1에서 볼 수 있듯이 두 HVAC 시스템간의 가장 큰 차이점은 IAQ sensor의 작동여부로 기존 VAV 시스템은 실내순환공기가 10 inch bypass duct를 통과하며, VAV/BPFS는 필터하우징으로 우회하면서 통과하도록 설계하였다. 특히 VAV/BPFS는 실내공기질이 적정수준으로 유지될 때까지 필터하우징을 통과하며, 실내공기질이 적정수준으로 유지되는 경우는 기존 VAV 시스템과 동일하게 작동되도록 설계하였다.

### 3. 연구결과

#### 3.1. 실내공기오염물질의 농도

본 연구의 평가대상 실내오염물질은 PM, TVOC 및 VOCs이었다. PM과 TVOC는 동일한 실험조건 하에서 연속적으로 측정하였으며 VOCs는 포집후 GC/MS를 이용하여 분석하였다. 각 시스템을 운전 시 실내오염물질의 농도는 총제거율(TER: Total Effective Removal Rate)을 지표로 하여 비교 평가하였다. TER은 실내오염물질의 총제거율로 누기율, 외부공기누입율, 여과율을 포함하는 개념으로 누기율은 실내공간내의 틈새나 실내외 온도차이에 의한 외부공기 유입량이며, 외부공기누입율은 시스템내에 유입되는 외부공기유입량이며, 여과율은 VAV/BPFS 내의 우회필터를 통해 여과되는 공기량으로 정의될 수 있다. TER은 식 (1)에 의해 평가할 수 있다.

$$C_t = C_0 \times e^{-(TER \times t)} \quad (1)$$

$C_t$ 는 t시간후 실내오염물질농도이며  $C_0$ 는 인위적 발생원에 따른 PM과 TVOC의 초기농도를 의미한다. 즉  $C_0$ 로부터  $C_t$ 까지의 농도감소는 누기, 외부공기유입량, 여과율에 의해 영향을 받게 되며 이들의 합을 TER로 정의하였다.

Fig. 2는 실내공간중 PM과 TVOC의 총제거율을 시스템별로 비교하여 나타내었다. PM의 총제거율은 VAV/BPFS가 사람수에 비례하여  $5.53\text{hr}^{-1}$ 에서  $9.70\text{hr}^{-1}$ 로, 기존 VAV시스템의 경우  $2.25\text{hr}^{-1}$ 에서  $3.77\text{hr}^{-1}$ 로 증가하는 경향을 보여주었다. TVOC의 총제거율은 VAV/BPFS가  $3.03\text{hr}^{-1}$ 에서  $4.47\text{hr}^{-1}$ , VAV시스템이  $2.45\text{hr}^{-1}$ 에서  $3.77\text{hr}^{-1}$ 로 PM의 총제거

율의 경향과 유사하였다. VAV/BPFS가 VAV 시스템에 비해 총제거율 약 1.2에서 2배 이상 증가되었는데 이는 시스템간의 제거효과의 차이로 VAV 시스템은 희석효과에 의해서, VAV/BPFS는 희석효과와 여과효과에 의해서 제거율의 차이가 남을 알 수 있었다.

실내오염물질의 희석효과는 시스템내로 유입되는 청정 외부공기의 유입량에 의존하며 여과효과는 VAV/BPFS에 장착된 우회필터 의한 오염물질이 제거율에 기인한다고 볼 수 있다. 또한 VAV시스템의 경우 PM과 TVOC의 총제거율이 비슷하였으나, VAV/BPFS의 경우 두 오염물질간의 총제거율이 차이가 나는 것을 볼 수 있는데 이는 오염물질별 필터의 제거효율의 차이에 기인한 것으로 사료된다.

실내공간에서 포집한 대상 VOCs는 Tenax가 충전된 aerotrap을 사용하였으며 미세펌프(Gilian, Gilian Instrument Corp.)를 이용하여 분당 20ml로 60분동안 시료를 채취하였다. Aerotrap은 열탈방식을 이용하여 GC/MS로 분석하였다. 대상 VOCs의 회수율은 벤젠이 75.3%로 가장 낮았으나 나머지 VOC는 90% 이상이었으며, 재현성은 3.7에서 5.1로 7% 이하였다. 시스템별 대상 VOCs의 농도를 Table 3에 나타내었다. TVOC의 결과와 유사하게 대상 VOC는 VAV/BPFS 이용시 VOC별로 약간의 차이는 있으나 기존시스템에 비해 농도가 약 20% 이상 감소함을 알 수 있었다. 물질별로는 톨루엔과 벤젠의 감소효율이 가장 높았다. TVOC나 VOCs의 농도감소는 우회필터시스템의 필터효율에 의존하며 본 시스템에서는 저효율 활성탄필터를 사용하여 PM의 제거율에 비해 매우 낮았으며 실내 VOCs의 적정관리를 위해선 고효율 활성탄 필터의 장착이 필요하다.

대상 오염물질의 감소효과를 시스템별 작동기전에 따라 살펴보면(Fig. 1, Table 1), 기존시스템의 경우 12 inch zone damper를 개폐정도에 따라 냉방된 공기를 실내에 제공하며 동시에 일부 실내공기를 외부로 배출하고 실외의 청정공기를 시스템 내에 유입후 실내공간에 제공하여 실내오염물질의 농도를 희석함으로 IAQ를 조절할 수 있다. 이때 기존 시스템은 12 inch filter damper는 닫힌 상태이며 12 inch zone damper는 실내의 열량 요구도에 따라 개폐하게 되며 나머지 공기는 10 inch bypass damper를 통해 시스템내에서 재순환된다. 반면에 VAV/BPFS는 실내오염물질의 농도가 증가되면 IAQ sensor가 이를 감지하고 12 inch filter damper를 100% 열고 10 inch bypass damper는 100% 닫아 실내의 오염된 공기를 여과하게 된다. 동시에 12

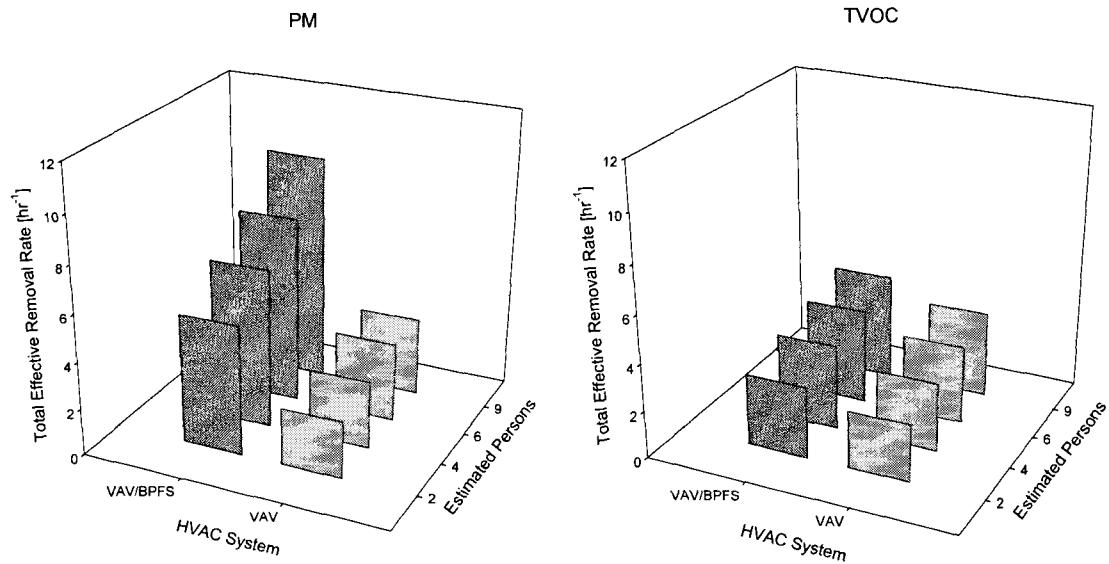


Fig. 2. Total effective removal rate of both systems by estimated persons.

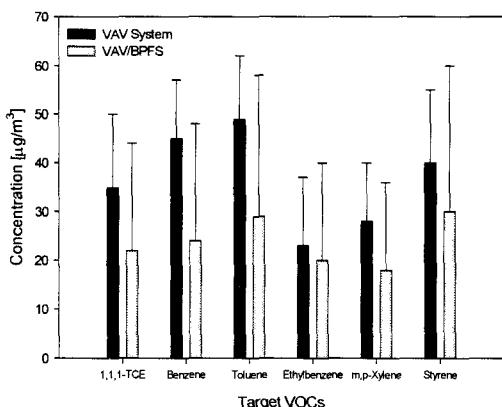


Fig. 3. Target VOCs concentration of both systems.

inch zone damper를 열어 실내온도를 조절한다.

VAV/BPFS의 실내온도 조절을 위한 작동기전은 기존시스템과 동일하다. 즉 시스템별 실내공기오염물질의 저감은 12 inch zone damper와 12 inch filter damper의 작동여부에 의존함을 알 수 있다. 각 시스템별로 대상오염물질이 TER에 미치는 영향을 분석하기 위해 시스템의 외부공기유입량과 여과율 및 실내공간의 누기율을 비교 평가하였다. 본 연구에서는 외부공기에 의한 영향을 배제하기 위해 시스템내 먼지제거를 위한 저효율 실외유입공기용 필터( $E_{f,o}$ )를 설치하여 외부로부터 유입되는 공기를 여과하도록 하였다. 두 시스템간의 실내오염물질의 저감효과를 비교해 보면 기존시스템의 경우 오염물질의 감소현상은 누기율과 외부공기에 의한 농도희석

에만 의존하며, VAV/BPFS는 누기율과 외부공기량에 따른 농도희석이외에 우회필터에 의한 여과효과에 의해 대상오염물질이 감소됨을 알 수 있다. Fig. 4는 두 시스템에 있어서 대상오염물질의 총제거율에 미치는 외부공기유입량, 누기율, 여과율의 영향을 퍼센트로 나타내었다. 대상오염물질인 PM, TVOC는 기존시스템에서 외부공기유입량이 총제거율에 미치는 영향은 약 85%를 상회하고 있으며 누기율은 약 15% 정도 영향을 주고 있다. 반면에 VAV/BPFS를 사용시 PM의 경우 외부공기유입량이 약 25%, 누기율이 약 5%, 여과율이 약 70%, TVOC의 경우 외부공기유입량이 약 50%, 누기율이 약 10%, 여과율이 약 40%정도 영향을 주어 실내오염물질의 농도가 낮아짐을 알 수 있었다.

### 3.2. HVAC시스템의 에너지 효율성

VAV/BPFS의 에너지 효율성을 평가하기 위해 외부공기유입량(OSA)과 CADR(Clean Air Delivery Rate)을 각 시스템 별로 측정 분석하고 총에너지 소모량을 구하였다. CADR은 실내공간내 청정공기의 유입량으로 정의되며 적정실내공기질의 유지에 매우 중요한 역할을 한다. VAV 시스템의 경우 CADR은 외부공기유입량으로 구성되며 VAV/BPFS의 CADR은 외부공기유입량과 우회필터에 의해 여과되는 여과공기량으로 구성된다. 실내에 유입되는 외부공기유입량과 CADR을 시스템별로 Fig. 5에 나타내었다. 두 시스템의 외부공기유입량을 비교해 보면 VAV/BPFS가 기존시스템에 비해 약 25% 정도가 감소됨을 볼 수 있다. 외부공기유입량은 실내의

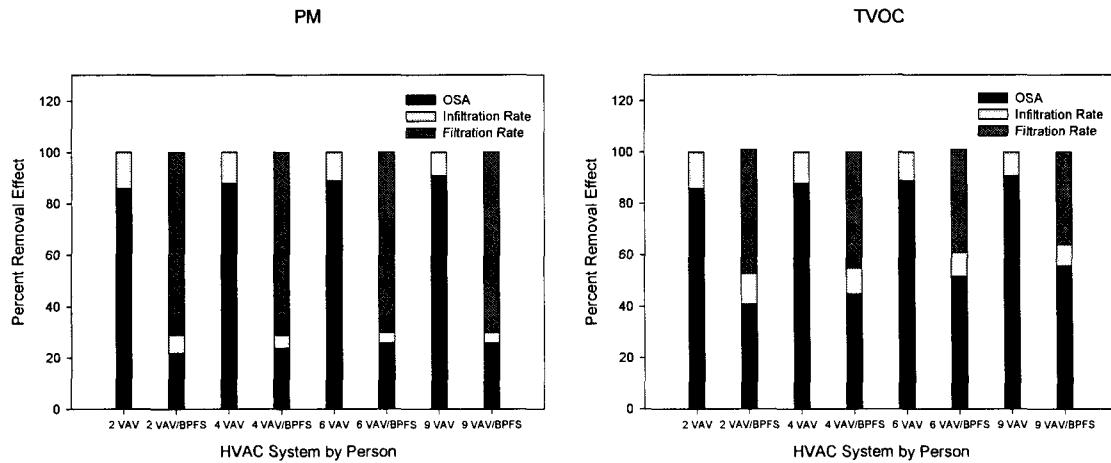


Fig. 4. Percent removal of PM, TVOC due to infiltration rate, outdoor supply air rate, and filtration rate for each system.

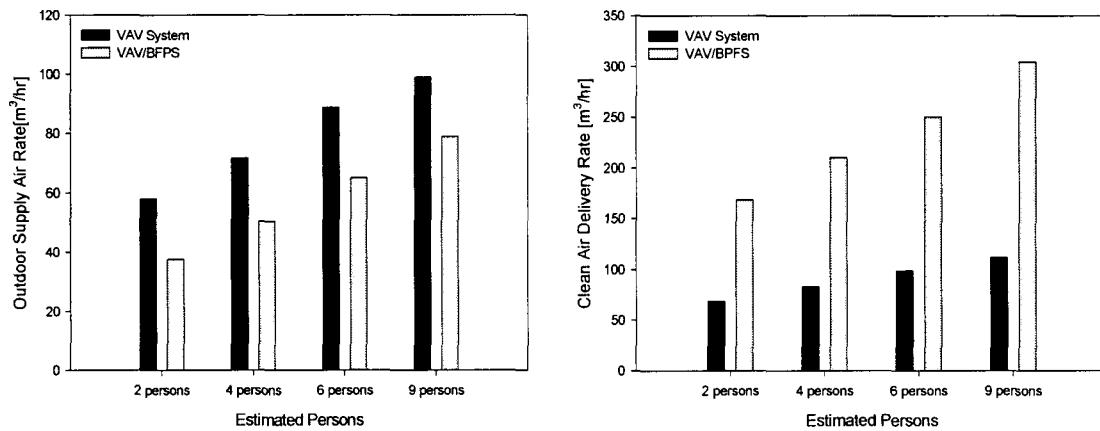


Fig. 5. Comparison of outdoor supply air rate and clean air delivery rate.

열적쾌적성을 위해 HVAC 시스템 내에서 적정온도로 냉, 난방된 후 실내에 공급됨으로 이 과정에서 많은 에너지가 소비된다. 따라서 외부공기유입량의 감소는 에너지절감이 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 또한 CADR은 두 시스템 모두에서 열적증가에 비례하여 증가함을 알 수 있으며, VAV/BPFS 이용시 열적쾌적도의 요구에 따라 기존시스템에 비해 CADR이 약  $100\text{m}^3/\text{hr}$ 에서  $180\text{m}^3/\text{hr}$ 까지 증가하여 약 150% 이상의 청정공기를 실내에 공급함을 알 수 있었다. 즉 VAV/BPFS는 기존시스템에 비해 외부공기유입량이 약 25% 감소하여 외부공기의 냉,난방에 따른 에너지소모를 최소화하며 우회필터시스템에 의한 CADR을 증가시켜 실내에 보급함으로 청정 실내 공기질을 유지할 수 있음을 알 수 있었다. Fig. 6은 두 시스템내의 에너지사용량을 보여준다. HVAC 시스템의 총에너지사용량은 송풍기, 냉각장

치, 냉각펌프의 에너지 합으로 계산할 수 있다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 VAV/BPFS의 총에너지 사용량이 기존시스템에 비해 평균 13% 이상 감소함을 알 수 있었다. VAV/BPFS의 총에너지 감소의 가장 큰 원인은 외부공기유입량의 감소에 따른 것으로 냉방시 냉각장치에 사용되는 에너지가 기존시스템에 비해 적어짐을 볼 수 있으며 송풍기의 에너지 사용량과 냉각펌프의 에너지 사용량은 기존시스템에 비해 약간 높아지는 경향을 보여주었다. 특히 VAV/BPFS에서 송풍기 에너지의 증가는 필터에 의한 압력손실에 기인하며, 냉각펌프의 에너지 증가는 기존 시스템에 설치한 NV1에 따른 영향으로 볼 수 있다.

### 3.3. 실내공기질 모델의 적용

HVAC 시스템을 사용시 실내공간의 오염물질농도를 예측하기 위해 두 시스템을 고려한 실내공기질 모델을 개발하였다<sup>16)</sup>. 각 시스템의 실내공기질

모델은 물질수지관계식을 통해 유도해 낼 수 있다. 본 연구는 시스템간 비교 연구임으로 기존시스템과 VAV/BPFS의 농도를 비교하기 위해 농도비 모델을 개발하였으며 Fig. 7을 기초로 유도하였다.

물질수지를 통한 VAV/BPFS 이용시 정상상태에서의 실내농도는  $C_{ss,VAV/BPFS}$ 로 유도될 수 있으며 식 (3)과 같다.

$$C_{ss,VAV/BPFS} = \frac{MK + C_o Q_o (1 - E_{f,o}) (1 - E_f) \left( \frac{Q}{Q - Q_b} \right)}{Q_o + Q_b E_{f,b} (1 - E_f) + (Q - Q_o) E_f} \quad (3)$$

단, K는 식 (4)와 같다.

$$K = \frac{\left(1 - \frac{Q_o}{Q}\right) \left[ \frac{Q_o}{Q} E_{f,o} (1 - E_f) + \left(1 - \frac{Q_o}{Q}\right) E_f + (1 - E_f) E_v \right] - \frac{Q_o}{Q} (1 - E_f) E_v}{\left(1 - \frac{Q_o}{Q}\right)^2 E_v} \quad (4)$$

식 (3)으로부터 기존시스템의 경우  $E_{fb}=0$  이므로  $C_{ss,VAV}$ 는 식 (5)와 같이 간략화 할 수 있다.

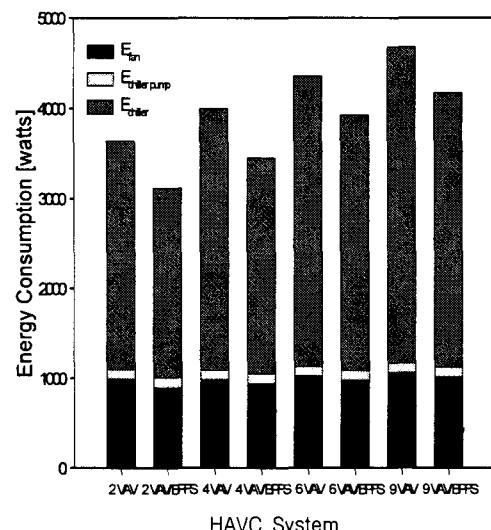


Fig. 6. Total energy consumption of both systems.

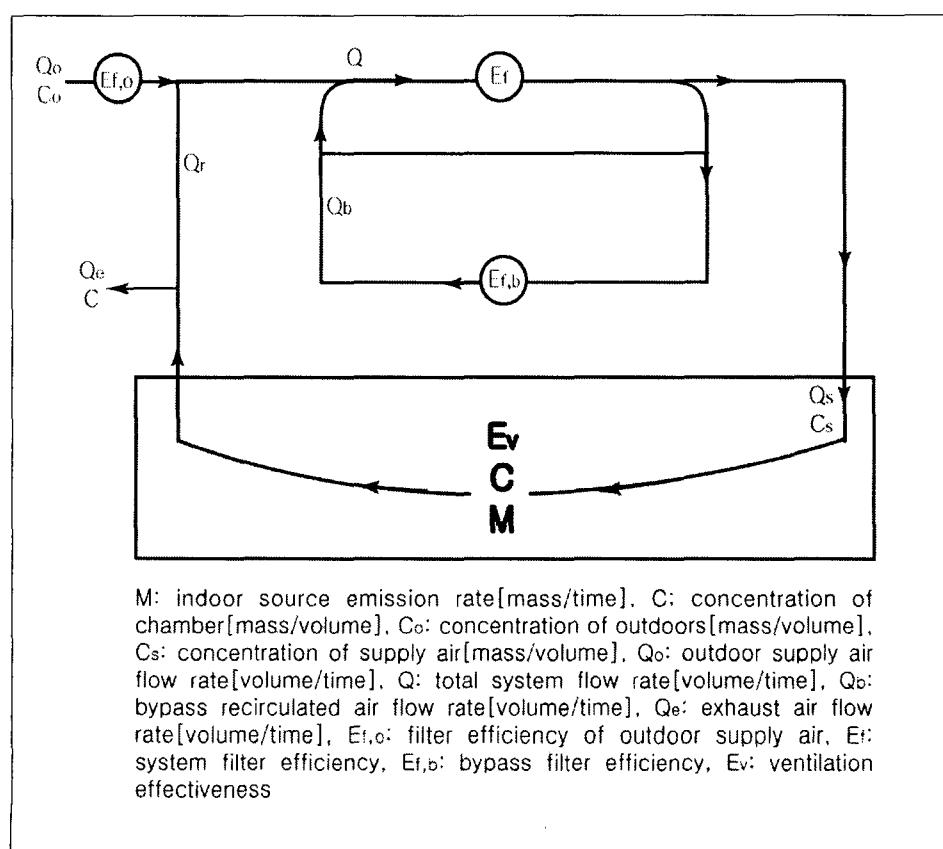


Fig. 7. Indoor Air Quality Model.

$$C_{ss,VAV} = \frac{MK + C_o Q_o (1 - E_{f,o}) (1 - E_f) (\frac{Q}{Q - Q_b})}{Q_o + (Q - Q_o) E_f} \quad (5)$$

단, K는 식 (6)과 같다.

$$K = \frac{(1 - \frac{Q_b}{Q}) \left[ \frac{Q_o}{Q} + (1 - \frac{Q_b}{Q}) E_f + (1 - E_f) E_v \right] - \frac{Q_o}{Q} (1 - E_f) E_v}{(1 - \frac{Q_b}{Q})^2 E_v} \quad (6)$$

실내오염물질농도의 시스템간 비교를 위해  $C_{ss,VAV/BPFS}$ 와  $C_{ss,VAV}$ 의 비로서 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{C_{ss,VAV/BPFS}}{C_{ss,VAV}} = \frac{\frac{M \left[ (Q - Q_b) Q + Q E_f (1 - E_f) + (Q - Q_b) E_f + (1 - E_f) E_v \right]}{(Q - Q_b)^2 E_f} + C_o (1 - E_{f,o}) (1 - E_f) \frac{Q}{(Q - Q_b)}}{\frac{Q + Q E_f (1 - E_f) + (Q - Q_b) E_f}{(Q - Q_b)^2 E_f} + C_o (1 - E_{f,o}) (1 - E_f) \frac{Q}{(Q - Q_b)}} \quad (7)$$

또한 실외공기중 대상오염물질의 농도를 무시할 수 있고,  $C_o Q_o = 0$ , 재정리하면, 식 (8)과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\frac{C_{ss,VAV/BPFS}}{C_{ss,VAV}} = \frac{\frac{Q_o + \frac{Q}{Q} E_{f,b} (1 - E_f) + E_f - \frac{Q}{Q} E_f + (1 - E_f) E_v}{Q} - \frac{Q_o + \frac{Q}{Q} E_{f,b} (1 - E_f) + E_f - \frac{Q}{Q} E_f}{Q}}{\frac{Q_o + E_f - \frac{Q}{Q} E_f + (1 - E_f) E_v}{Q} - \frac{Q_o + E_f - \frac{Q}{Q} E_f}{Q}} \quad (8)$$

위 식에서 실내오염물질의 발생량은 동일 실험조건에 대한 양이므로 두 시스템에서 상수의 개념이며 비교식에는 포함치 않았다. 그러나 두 시스템간의 비교식에서 시스템간의 농도는 실외공기비 ( $Q_o/Q$ ), 우회유량비( $Q_b/Q$ ), 주시스템필터의 효율

( $E_f$ ), 우회필터효율( $E_{f,b}$ ), 환기효율성( $E_v$ )의 함수임을 알 수 있다. Table 2는 기존시스템과 VAV/BPFS의 오염물질별 농도비에 따른 예측치와 실측치를 비교하여 나타내었다. 실내공기질모델에 따른 예측치와 실측치의 시스템별 농도비를 비교한 결과 TVOC의 경우 10% 이하의 차이를 보이며 PM의 경우 예측치와 실측치가 2배 이상의 차이를 보여 본 농도비 모델의 경우 PM과 같은 입자상 오염물질보다 TVOC와 같은 가스상 오염물질의 예측에 더 적합한 모델임을 보여주었다.

#### 4. 결 론

VAV/BPFS의 실내공기질과 에너지 개선 효과를 평가하기 위해 온도, 상대습도 및 공기순환율 등을 조절할 수 있는  $32.6\text{m}^3$ 의 알루미늄 공간에서 24회의 실험을 반복하여 실시하였다. 본 연구의 수행을 위해 실내공간내에 2인, 4인, 6인, 9인의 열량을 200 watts 전구를 이용하여 모사하였으며 실내오염물질의 발생원으로 연기발생장치와 스프레이를 사용하였다. 대상 오염물질 PM, TVOC 및 온도와 유량을 연속 측정하였으며 대상 VOCs는 포집후 냉동 보관 후 분석하였다. VAV/BPFS의 평가는 대표적인 실내오염물질인 PM과 TVOC 및 VOCs를 대상으로 하였으며 CADR, 외부공기유입량 및 에너지소모량을 비교 평가하였으며 적정한 실내공기질 모델을 제안하였다. 본 연구의 구체적 결론은 다음과 같다.

첫째, PM의 총제거율은 VAV/BPFS가 열원의 증가에 따라  $5.53\text{hr}^{-1}$ 에서  $9.70\text{hr}^{-1}$ 로, 기존 VAV시스템의 경우  $2.25\text{hr}^{-1}$ 에서  $3.77\text{hr}^{-1}$ 로 증가하였으며, TVOC의 총제거율은 VAV/BPFS가  $3.03\text{hr}^{-1}$ 에서  $4.47\text{hr}^{-1}$ , VAV시스템이  $2.45\text{hr}^{-1}$ 에서  $3.77\text{hr}^{-1}$ 로 증가하였다. 총제거율의 차이는 VAV 시스템이 희석효과에 의존하는 반면에 VAV/BPFS는 희석효과와 우회필터에 의한 여과효과에 의해 실내오염물질의 제거효율이 높아짐을 알 수 있었다. 둘째, 각 시스별

Table 2. Comparison of predicted versus measured PM, TVOC concentration ratios

Pollutant	Persons	Predicted Ratio	Measured Ratio
TVOC	2	$0.63 \pm 0.03^*$	$0.66 \pm 0.06$
	4	$0.60 \pm 0.02$	$0.65 \pm 0.08$
	6	$0.59 \pm 0.03$	$0.64 \pm 0.08$
	9	$0.56 \pm 0.02$	$0.63 \pm 0.10$
PM	2	$0.41 \pm 0.02$	$0.23 \pm 0.11$
	4	$0.39 \pm 0.01$	$0.22 \pm 0.14$
	6	$0.39 \pm 0.02$	$0.21 \pm 0.10$
	9	$0.38 \pm 0.02$	$0.19 \pm 0.07$

\* Mean±S.D.

외부공기유입량과 CADR을 비교해 보면 VAV/BPFS가 VAV 시스템에 비해 외부공기유입량이 약 25% 정도 감소되어 시스템 에너지소모량을 감소시킬 수 있었으며, VAV/BPFS의 CADR은 VAV 시스템에 비해 약 150% 증가함에 따라 적정실내공기질을 유지하는데 효과적임을 알 수 있었다.셋째, VAV/BPFS의 총에너지 사용량은 VAV 시스템에 비해 약 11%에서 16% 정도 감소하였으며 이는 VAV/BPFS가 외부공기의 감소에 따른 것으로 냉방 시 냉방장치에 사용되는 에너지가 기존시스템에 비해 작아지기 때문이다. 반면에 송풍기와 냉각펌프의 에너지 사용량은 약간 증가하는 경향을 보여 주었다. 넷째, 본 연구에서 제시한 실내공기질 모델은 두 HVAC 시스템간의 농도비 모델로 입자상 오염물질 보다 가스상 오염물질의 예측에 더 적합한 모델임을 보여주었다.

본 연구에서 제시한 VAV/BPFS의 IAQ 결과와 에너지소모량결과를 기준시스템과 비교해 볼 때 본 시스템은 CADR을 극대화하여 실내공기질을 개선하며 동시에 에너지효율을 증가시킬 수 있는 효과적인 시스템임을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- 1) Lee, C. S., W. M. Li and C. H. Ao, 2002, Investigation of indoor air quality at residential homes in Hong Kong-case study, *Atmospheric Environment*, 36, 225-237.
- 2) Junker, M., T. Koller. and C. Monn, 2000, An assessment of indoor air contaminants in buildings with recreational activity, *The Science of the Total Environment*, 246, 139-152.
- 3) Jones, A. P., 1999, Indoor air quality and health, *Atmospheric Environment*, 33, 4535-4564.
- 4) Wargocki, P., Z. Bako-Biro, G. Clausen and P. O. Fanger, 2002, Air quality in a simulated office environment as a result of reducing pollution sources and increasing ventilation, *Energy and Buildings*, 34, 775-783.
- 5) Redlich, C. A., J. Sparer and M. R. Cullen, 1997, Sick-building syndrome, *The Lancet*, 349, 1013-1016.
- 6) Grot, R. A., A. T. Hodgson, J. M. Daisey and A. Persily, 1991, Indoor air quality evaluation of a new office building, *ASHRAE Journal*, 33, 16-25.
- 7) Molhave, L. and M. A. Thorsen, 1991, A model for investigations of ventilation systems as sources for volatile organic compounds in indoor climate, *Atmospheric Environment*, 25a, 241-249.
- 8) ASHRAE Standard 62-1989, 1989, Ventilation for acceptable indoor air quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, ASHRAE Publications.
- 9) Choi, S. W., 1996, Indoor air quality: An overview of emission sources and control strategies, *Journal of Nokdong Environmental Research Institute*, 1, 113-134.
- 10) ASHRAE, 1985, System Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, ASHRAE Publications.
- 11) Sauer, Jr. H. J. and R. H. Howel, 1992, Estimating the indoor air quality and energy performance of VAV system, *ASHRAE Journal*, 7, 43-50.
- 12) Mcquiston, F. C. and J. D. Parker, 1988, Heating, ventilation, and air conditioning analysis and design, third edition, John Wiley & Sons, NY.
- 13) Rickelton, D. and H. P. Becker, 1972, Variable Air Volume, *ASHRAE Journal*, 9, 31-55.
- 14) Choi, S. W., D. J. Moschandreas and M. Meckler, 1995, Testing of VAV/BPFS for reduced energy consumption and improved IAQ, *IAQ*, 95, 31-35.
- 15) Moschandreas, D. J., S. W. Choi and M. Meckler, 1994, Variable-air-volume/bypass filtration system(VAV/BPFS) performance with respect to indoor air quality, *Healthy Buildings 94, Proceedings of the 3rd International Conference*, 2, 455-460.
- 16) 최성우, 1997, 실내공기질 모델을 이용한 환기시스템의 공기정화효율성 평가, *한국환경위생학회지*, 23(4), 57-66.