

VAV/BPFS를 이용한 실내공기 오염물질의 효율적 제어

최 성 우
계명대학교 환경학부
(1997년 8월 29일 접수)

Effective Control of Indoor Air Pollutant using VAV/BPFS

Sung-Woo Choi

Faculty of Environmental Studies, Keimyung University, Taegu 704-701, Korea
(Manuscript received 29 August 1997)

The oil crisis of the 1970s and the rise in oil prices motivated people to implement energy conservation strategies. Buildings were fitted with additional insulation and reduced ventilation rates. The reduction of mechanical and natural ventilation rate led to increases in indoor pollutant concentrations which resulted in increased health risks from indoor exposure to pollutants. The variable-air-volume/bypass filtration system(VAV/BPFS) is a variation of the conventional VAV systems, The VAV/BPFS is an electronically controlled system that provides cost-effective thermal comfort and acceptable indoor air quality. Under controlled conditions in a chamber, a series experiments were performed to compare the ability of a VAV/BPFS to remove indoor aerosol concentration and to reduce energy consumption with that ability of conventional VAV system. Results show that the VAV/BPFS increases the effective ventilation rate and removes indoor air pollutant, and maintains acceptable indoor air quality without sacrificing energy consumption.

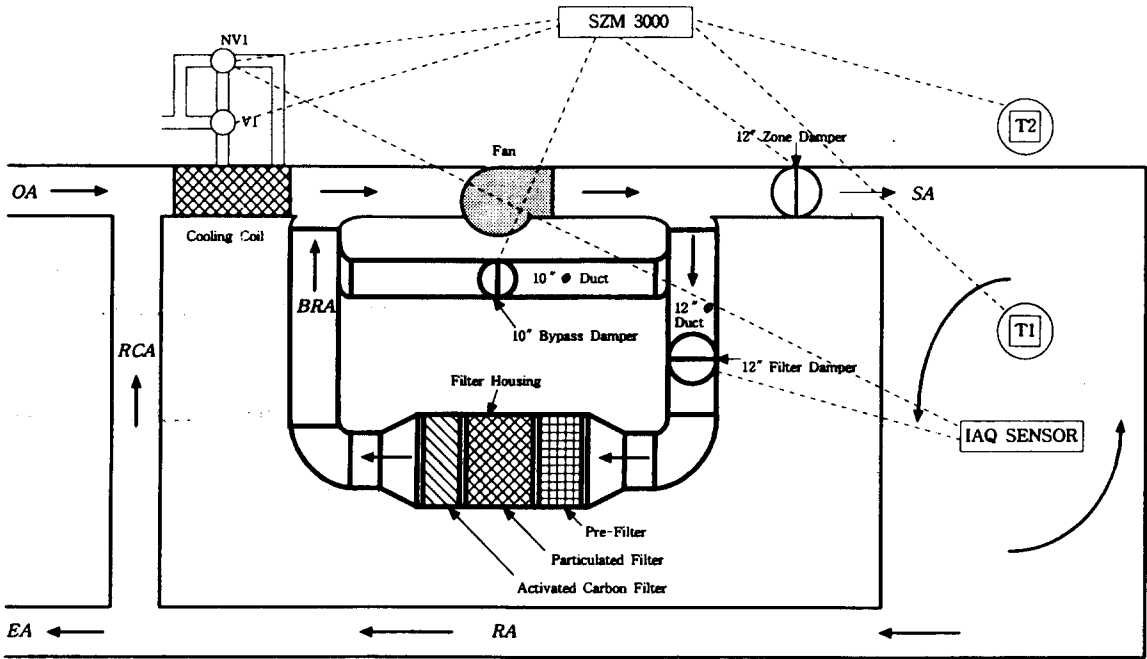
Key words : Ventilation System, VAV System, VAV/BPFS, Indoor Aerosol, Indoor Air Quality

1. 서 론

비산업성 실내환경 특히 주거환경, 상업환경, 일반빌딩등은 비교적 유해물질로부터 안전한 지역으로 인식되어 왔다. 그러나 1970년대의 에너지파동은 모든 실내환경에 대해 에너지절약을 요구하게 되었고, 비산업성 실내환경내의 절연물질의 사용과 환기율(Ventilation Rate)을 줄임으로써 에너지 효율성을 높이게 되었다. 그러나 환기량의 감소와 실내공간의 밀폐화는 실내오염물질의 정체화 현상을 일으켜 실내공기질(Indoor Air Quality)은 악화되었으며, 이로 인한 잠재적인 인체유해도(Health Risk)는 더욱 증가하였다. 특히 WHO(1983)는 일반 사무빌딩 내에서 느끼는 불쾌감이나 건강장애를 Sick Building Syndrome(SBS)이라 정의하였다. 최근에 들어 많은 연구자들의 발표에 따르면 이러한 빌딩증후군은 실내공간의 불충분한 환기율과 상관성이 높다고 보고하였다(Von Dongen, 1989; Hedge et al., 1989a,b). 또한 실내공기질 문제를 해결하기 위해선 충분한 환기량을 실내공간에 제공함으로써 실내의 유해성 오염물질에 의한 인체유해도를 최소화 할 수 있다고 보고하였다. 최근 미국의 ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers)(1989)는 실내공기오염과 관련시켜 각 실내공

간의 특성에 따른 최소환기율을 권장하고 있으며, 적정 실내공기질을 유지하기 위한 여러 가지 대안을 제시하고 있다. 특히 적정 실내공기질(Acceptable Indoor Air Quality)은 적어도 80퍼센트 이상의 사람이 불만을 느끼지 않을 정도의 공기질"이라 정의하였으며, 쾌적한 실내환경을 유지하기 위해선 적정 환기율을 유지해야 한다고 보고하였다.

실내공기질을 결정하는 주요요소는 실내오염물질 발생원, 실외유입공기중의 오염물질농도, 인간의 실내활동, 환기율, 누기율 및 제어방법등이 있으나 실내오염물질 발생원은 실내공기질을 결정하는 가장 중요한 요인이라 볼 수 있다. 실내오염물질은 담배(Environmental Tobacco Smoking; ETS), 빌딩재료, 연소기구, 생필품 등 매우 다양하다. 특히 ETS는 다양하고 많은 종류의 잠재적 발암성물질을 가지고 있어 실내공기질과 연관되어 많은 연구가 진행되고 있다. US DHHS(1986)의 연구에 따르면 4500종류이상의 물질이 흡연시에 발생되며 이 중 약 50여종은 알려진 또는 의심스러운 발암성 물질로 정의하였으며, 흡연이 다른오염원에 비해 많은 양의 에어로졸을 발생한다고 보고하였다. Georghlou et al.(1991)은 ETS를 포함한 실내환경중 20에서 3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 에어로졸농도를 측정하였고, Spengler



LEGEND)
 OA: Outdoor Air; EA: Exhaust Air; SA: Supply Air; RA: Return Air; RCA: Recirculated Air; BRA: Bypass Recirculated Air
 IAQ Sensor: Indoor Air Quality Sensor
 NV1: New Valve
 VI: Valve

Fig. 1. Variable-Air-Volume/Bypass Filtration System.

et al.(1981)은 실내공기중 호흡가능한 분진이 흡연가가 있는 실내환경에서 보다 높게 검출되었다고 보고하였다.

실내공기질을 개선하기 위한 실내 오염물질의 제어 전략으로는 실내 오염물질을 감소시키는 방법과 실내 오염원을 제거 또는 대체하는 방법이 있으나 전자를 많이 사용하고 있다. 실내 오염물질의 감소는 실외 공기의 유입에 따른 희석, 또는 공기정화기를 이용한 여과에 의해 가능하다. 특히 실내 오염물질의 희석 및 여과에 따른 감소효과는 환기 시스템의 성능과 작동법에 의존하므로 적정 실내공기질을 유지하기 위해서는 환기 시스템의 선정이 매우 중요하다(ASHRAE 1989). 일반적으로 비산업성 실내환경의 환기 시스템은 constant volume (CV) 시스템과 variable-air-volume (VAV) 시스템으로 분류할 수 있으며, 각 시스템은 용도에 따라 더욱 세분화 될 수 있다. CV시스템은 적정실내공기질의 유지에는 적합하나, 에너지 소모량이 큰 단점을 가지고 있어 1970년 이전에 주로 사용하였다. 에너지 파동 이후 CV시스템은 에너지 소모량을 최소화 할 수 있는 VAV 시스템으로 전환되어 실내공간내의 에너지를 보전할 수 있었다. 그러나 VAV 시스템은 외부로부터 도입되는 실외공기량을 줄임으로써 에너지 소모량을 감소시켰으나, 실외공기량의 감소 즉 환기율의 감소로 인해 실내 공기질은 더욱 악화되고 있는 실정이다. 본 연구에서 사용된 Variable-Air-Volume/Bypass Filtration System (VAV/BPFS)은 기존의 VAV시스템을 변형하여 실

내로부터 재순환되는 오염된 공기와 실외공기를 동시에 정화하고, 실외공기의 유입량을 최소화함으로써 환기시스템의 에너지 소모량을 줄이기 위해 고안되었다.

본 연구는 제어된 동일조건하의 chamber내에서 VAV/BPFS와 기존의 VAV 시스템간의 실내오염물질의 감소효율을 평가하고, 환기시스템의 총에너지소모량을 비교분석함으로써 쾌적한 실내공기질의 유지와 에너지 보전을 위한 새로운 실내공기질 제어방법을 제공하고자 한다.

2. 재 료

2.1 실험재료 및 방법

모든 실험은 32 m³의 알루미늄 chamber에서 수행하였으며, 이 chamber는 온도, 습도, 및 유량을 조절할 수 있도록 설계되어 있다. 본 연구에서 개발된 VAV/BPFS는 chamber에 맞도록 구조 및 설계를 변경하였으며, 기존의 시스템 mode와 VAV/BPFS mode 로 선별적으로 작동하도록 하였다. 기존의 VAV시스템과 VAV/BPFS를 비교하기 위하여 인위적으로 실내 오염물질을 발생시켰으며, 실내 오염원으로는 담배와 스프레이식 방향제를 사용하였다. 실내 오염물질의 발생량을 동일하게 하기 위하여 담배의 경우 smoking machine을 사용하였으며, 방향제는 일정한 시간동안 분무하였다. 또한 200 watts의 전구를 다량 설치하여 인위적으로 chamber에 공급되는 열량을 조절하였다. 각 400, 800, 1200, 1900 watts의 열량을 사용하였으며, 각 200

watts의 전구는 chamber 내에 한 사람이 활동하여 발열되는 열량이다. 모든 실험은 냉방 조건을 중심으로 진행하였으며, 각 시스템이 작동되기 위한 실내 적정온도는 24℃로 정하였다.

실내 공기질은 실내 에어로졸 농도의 총감소율과 정화공기전달률로서 평가하였으며, 본 연구의 수행을 위해 동일 조건하에서 단일 열량 실험과 연속 열량 실험을 실행하였다. 단일 열량 실험은 단일 열량을 이용하여 실내 오염물질의 총감소율과 에너지 소모량을 측정하였으며, 총 실험시간은 120분으로 3회 반복 실시하였다. 연속 열량실험은 chamber내의 열량을 단계적으로 증가시켜 실내 오염물질농도의 변화량을 비교 분석하였으며, 총 실험시간은 240분으로 6회 반복 실시하였다. 각 실험은 실험시작 직전에 chamber내의 열적 평형화를 취하고 배경 농도를 측정하였으며, 열원과 실내 오염원을 도입 후 매 10분 간격으로 실내 오염물질의 농도와 온도 변화량, 유량 및 환기 시스템의 에너지소모량을 측정하였다. 실내 에어로졸의 농도는 Model Ram-1 real-time aerosol monitor(MIE)를 사용하였으며 실험 전후에 걸쳐 QA/QC를 하였다. 또한 chamber내의 온도와 시스템의 유량은 Model CT-830-D (HY-Cal Engineering)와 Magnehelic Air Filter Gages (Dwyer)를 사용하였다.

2.2 환기 시스템

VAV/BPFS는 환기 시스템의 에너지 소모량을 최소화하고 쾌적한 실내공기질을 유지하기 위해 개발되었다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 VAV/BPFS이다. VAV/BPFS는 SZM 3000 zone controller (Zone-all Control Systems Inc.)와 IAQ sensor (Staeffa Control System Inc.)에 의해서 작동된다. SZM 3000은 실내의 열적 쾌적성을 유지하며, IAQ sensor는 적정 실내 공기질을 제어한다. SZM 3000의 주요기능은 실내의 적정 온도를 유지하기 위해 실내 온도(T1)와 실외 온도(T2)를 감지하여 실내 적정 온도와 비교후 환기 시스템의 작동 여부를 결정한다. 즉 실내 온도가 증가하여 적정 온도(24℃)이상이 되었을 경우 SZM 3000은 이를 감지하여 냉방 모드로 전환하고, 12 inch zone damper를 열어 chamber내에 냉방 공기를 공급하여 열적 쾌적성을 유지한다. 반면 IAQ sensor는 chamber내의 실내 공기질이 악화되었을 경우 12 inch filter damper를 작동하여 적정 실내공기질을 유지하며, chilled water 밸브(NV1)를 열어 시스템 자체의 냉방 효율을 극대화한다. IAQ sensor는 실내 공기오염도가 높을 경우 12 inch filter damper를 100 퍼센트 열고 10 inch bypass damper를 닫아 재순환 공기와 실외 공기를 정화한다. 우회 필터 시스템은 두 가지 종류의 필터를 가지고 있어, 실내 공기중의 에어로졸과 유해성 유기 오염물질을 동시에 제거할 수 있도록 설계되었다. 우회 필터 시스템에 장착된 필터는 고효율 분진필터 (filter efficiency with 90 to 95 percent, Farr Company)와 저효율 분진 필터 (filter efficiency with 60 to 65 percent, Farr Company) 및 활성탄 필터 (filter ef-

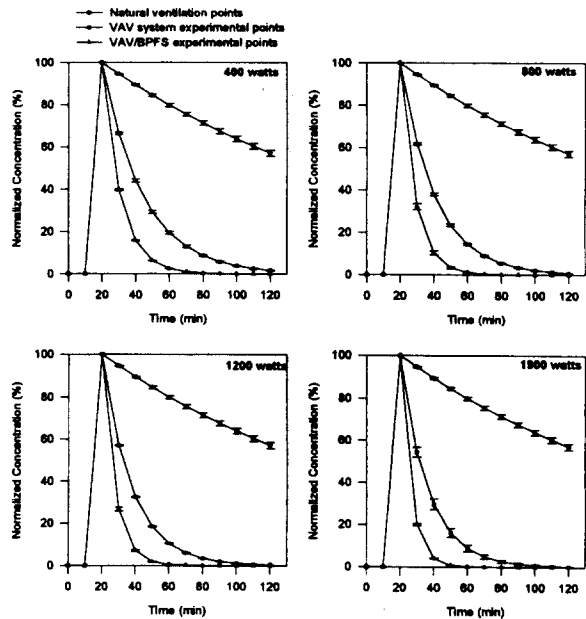


Fig. 2. Variation of Average Indoor Aerosol Concentration for Both Systems with Each Energy Load.

iciency with 30 to 35 percent, Farr Company)이다.

VAV/BPFS와 기존 VAV시스템의 차이점은 IAQ sensor의 작동 방식에 있다. 즉, IAQ sensor는 VAV/BPFS에서만 작동하며, 기존의 VAV시스템에서는 작동하지 않도록 설계하였다. 즉 기존 VAV시스템의 경우 12 inch zone damper와 10 inch bypass damper를 사용하여 실내의 열적 쾌적성을 유지하는 반면, VAV/BPFS는 12 inch zone damper와 10 inch bypass damper 및 12 inch filter damper를 사용하여 열적 쾌적성과 실내공기질을 동시에 제어할 수 있도록 설계하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실내오염물질의 농도

실내 오염물질의 농도 변화량을 평가하기 위해 동일 조건하에서 단일 열량실험을 3회, 연속 열량 실험을 필터의 효율에 따라 각 6회 실시하였다. Fig. 2는 단일 열량 사용시 실내 에어로졸의 농도 변화량을 나타낸다. 본 실험은 처음 10분 동안은 chamber내의 열적 안정화와 배경 농도를 측정하였으며, 20분에 smoking machine를 작동시켜 연기를 발생시켰다. 사용된 단일 열량은 400, 800, 1200, 과 1900 watts로 각 2명, 4명, 6명, 9명의 사람이 chamber내에 거주시 발생하는 열량을 나타낸다. 본 실험에서 사용된 실내 적정 온도는 24 ℃로 열원에 의해 chamber의 온도가 적정 온도 이상 증가할 경우, 실내의 열적 쾌적성을 유지하기 위해 환기 시스템은 냉방 공기를 chamber에 공급하여 과잉의 열을 제거하여 적정온도를 유지한다. 실내 오염원과 단일 열량을 도입한 20분대 부터 chamber내의 에어로졸의 농도는

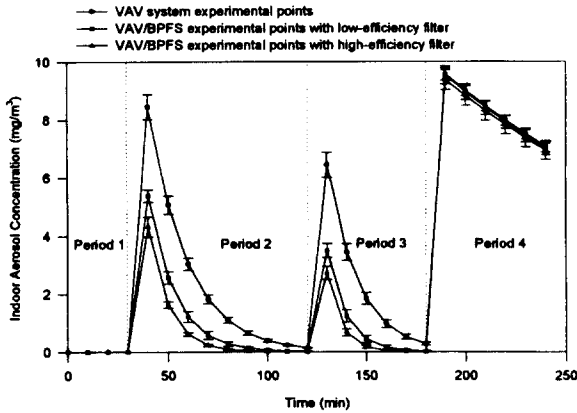


Fig. 3. Variation of Average Indoor Aerosol Concentration for Both Systems with Stepwise Increased Energy Load.

두 시스템 모두에서 열량에 비례하여 급격히 감소하였다. 본 환기 시스템은 실내의 열량 변화량에 따라 12 inch zone damper의 열림 각도가 달라지며, 그 열림 각도에 의해 실외 공기 유입량을 자동적으로 조절하게 된다. 즉 실내의 열량이 증가 할 경우 12 inch zone damper의 열림 각도가 커져 실내로 유입되는 냉방 공기의 공급 유량이 많아지며, 시스템 자체의 유량수지에 의해 실외 공기 유입량 또한 증가하게 된다. 따라서 높은 열량은 환기량을 증가시키고 이에 따라 실내 오염물질의 희석에 따른 감소효과는 더욱 커지게 된다. 결과적으로 열량이 증가할수록 농도의 변화율은 비례적으로 감소함을 볼 수 있었다. 시스템간의 농도 변화율 비교시 VAV/BPFS가 기존의 VAV시스템에 비해 상대적으로 감소하는 현상을 볼 수 있었으며, 이는 VAV/BPFS의 경우 희석효과 이외에 우회 필터의 효과가 증가됨에 따른 것이다.

Fig. 3은 연속 열량 실험의 결과를 보여준다. 연속 열량 실험은 실험의 조건에 따라 4 period로 나누었으며 실내 오염원인 담배 연기와 스프레이는 각 30분, 120분, 180분대에 발생시켰다. Period 1(0분~30분)은 chamber내에 거주자나 오염원이 없는 상태로 chamber내의 열적 평형을 취하였으며 실내의 에어로졸의 바탕 농도를 측정하였다. Period 2 (40분~120분)는 열량을 400 watts에서 1200 watts 까지 단계적으로 상승시켜 농도 변화량과 에너지 소모량을 측정하였다. 이 기간 동안은 실내 공간에 사람의 수와 실내 오염원이 연속적으로 발생 또는 증가할 경우 실내 오염물질의 농도 변화량과 에너지소모량을 비교 평가하였다. Period 3 (130분~180분)은 열량을 1900 watts로 증가시켰으며, period 4 (190분~240분)는 chamber내에 열량의 공급이 없으며 실내 오염원만을 chamber내에 유입하여 환기율이 전혀 없는 상태로 실내 오염원이 연속적으로 발생될 상황을 예측하였다. 열적 변화량과 실내오염원이 없는 period 1에서는 chamber내의 바탕농도를 유지하였으며 chamber내의 바탕농도는 실외공기의 농도와 같았으며 약 0.001 mg/m³으로 거의 모든 실험에서

일정하였다. 환기량이 없고 실내 오염물질이 발생되는 period 4는 농도 변화량이 매우 완만하게 감소하는데 이는 chamber의 실내의 온도 및 압력의 차에 의해 발생하는 자연 침기(infiltration)에 의한 것으로 두 시스템 간에는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 periods 2와 3에서는 농도의 변화량이 시간에 따라 급격히 감소하였고, 각 시스템의 최대 농도 비교시 period 3이 period 2에 비해 현저히 감소하는 현상을 보여 주는데 이는 열량의 증가에 따라 실외 공기 유입량이 증가하였기 때문이다. 연속 열량 실험의 농도변화량은 단일 열량 실험과 유사한 형태를 보여 우회 필터를 가진 VAV/BPFS가 실내 에어로졸을 감소하는데 보다 효율적임을 알 수 있었다. 또한 고효율 필터를 이용시 실내 에어로졸의 농도 변화율은 저효율 필터에 비해 약 30 퍼센트 증가하였다.

3.2 실내오염물질의 총감소율 및 정화공기전달률

실내공기질은 실내 오염물질의 총감소율 (total decay rate, hr⁻¹) K_t와 정화공기전달률 (Clean Air Delivery Rate, CADR)로서 평가하였다. 총감소율 K_t는 실외 공기의 유입에 따른 오염물질의 희석, 필터 또는 공기 정화기에 의한 오염물질의 제거율 등 실내 공기 오염물질을 감소시키는 일련의 모든 제거 기전을 포함하는 것으로 lnC_i와 t_i의 선형 회귀식을 이용하여 구하였다.

$$K_t = \frac{(\sum_1^n t_i \ln C_{i1}) - (\sum_1^n t_i) (\sum_1^n \ln C_{i1})}{\sum_1^n t_i^2 - \frac{(\sum_1^n t_i)^2}{n}}$$

CADR은 실제적으로 깨끗한 공기가 실내 공간에 얼마만큼 유입되는가를 평가하는 것으로 적정 실내공기질의 유지를 위해 매우 중요한 평가항목이다. CADR은 다음 공식에 의해 계산하였으며,

$$CADR = V(K_t - K_n)$$

V는 사용된 chamber의 부피 (m³)이며, K_n은 자연 감소율(natural decay rate, hr⁻¹)로서 다음 공식에 의해 계산하였다.

$$C_t = C_0 e^{-K_n t}$$

C_t는 임의의 시간 t에서의 농도이며 C₀는 초기 농도이다. Table 1은 단일 열량 실험과 연속열량 실험의 실내 에어로졸의 총감소율과 CADR을 나타낸다. 단일 열량 실험에서는 기존 VAV시스템의 경우 총감소율은 2.45 hr⁻¹에서 3.77 hr⁻¹로 열량에 비례하여 증가하였으며, VAV/BPFS의 경우 총감소율은 5.53 hr⁻¹에서 9.70 hr⁻¹로, 기존 VAV시스템에 비해 약 두 배 이상 증가하였다. 연속 열량 실험에서는 고효율 필터를 사용한 경우 총감소율이 5.85 hr⁻¹에서 8.39 hr⁻¹이었으며, 총감소율의 증가량은 단일 열량 실험이 비슷한 경향을 보이며, 기존 VAV시스템에 비해 두 배 이상 증가하였다. 반면에 저효율 필터를 장착한 경우에는 총감소율이 4.49 hr⁻¹에서 6.29 hr⁻¹이었으며, 총감소율은 기존 VAV시스템에 비해 50 퍼센트 이상 증가하였다. 총감소율에 따른 실내 공

Table 1. Total Decay Rate and Clean Air Delivery Rate of Both Systems

Experiment	System	Filter	Energy(W)	Linear Regression	r ²	K _t (hr ⁻¹)	CADR (m ³ /hr)
One energy load	VAV	-	400	ln Conc = -2.45t	0.98	2.45	68.46
		-	800	ln Conc = -2.90t	0.98	2.90	83.13
		-	1200	ln Conc = -3.38t	0.99	3.38	98.78
		-	1900	ln Conc = -3.77t	0.99	3.77	111.49
	VAV/BPFS	HEPF ¹	400	ln Conc = -5.53t	0.98	5.53	168.54
		HEPF	800	ln Conc = -6.80t	0.99	6.80	210.37
		HEPF	1200	ln Conc = -8.03t	0.99	8.03	250.37
		HEPF	1900	ln Conc = -9.70t	0.98	9.70	304.48

Experiment	System	Filter	Period	Linear Regression	r ²	K _t (hr ⁻¹)	CADR (m ³ /hr)
Stepwise increased energy load	VAV	-	Period 2	ln Conc = -3.03t	0.99	3.03	86.39
		-	Period 3	ln Conc = -3.75t	0.99	3.75	109.86
	VAV/BPFS	HEPF	Period 2	ln Conc = -5.85t	0.98	5.85	178.32
		HEPF	Period 3	ln Conc = -8.39t	0.99	8.39	261.13
		LEPF ²	Period 2	ln Conc = -4.49t	0.98	4.49	133.99
		LEPF	Period 3	ln Conc = -6.29t	0.99	6.29	192.67

HEPF¹: High-Efficiency Particulate Filter

LEPF²: Low-Efficiency Particulate Filter

Table 2. Mechanical Ventilation Rate (K_m) of Both Systems

Experiment	Energy(W)	VAV System (hr ⁻¹)	VAV/BPFS (hr ⁻¹)
One energy load	400	2.08 ± 0.03	1.23 ± 0.02
	800	2.50 ± 0.05	1.63 ± 0.05
	1200	2.93 ± 0.08	2.07 ± 0.05
	1900	3.35 ± 0.05	2.52 ± 0.06

Experiment	Period	VAV System (hr ⁻¹)	VAV/BPFS with HEPF ¹	VAV/BPFS with LEPF ¹
Stepwise increased energy load	Period 2	2.64 ± 0.09	1.73 ± 0.04	1.78 ± 0.05
	Period 3	3.33 ± 0.12	2.47 ± 0.05	2.54 ± 0.05

HEPF¹: High-Efficiency Particulate Filter

LEPF²: Low-Efficiency Particulate Filter

기질의 평가에서는 우회 필터를 장착한 VAV/BPFS가 기존 VAV시스템에 비해 효과적으로 실내 에어로졸 농도를 감소시킬 수 있었다. 또한 CADR평가에서는 단일 열량 실험과 연속 열량 실험 모두에서 VAV/BPFS의 CADR이 기존 시스템에 비해 두 배이상 증가하였으며, 이는 여과에 의해 재순환 공기가 정화되어 재사용 되었음을 의미한다. 즉 VAV/BPFS는 정화된 재순환 공기를 재사용 함으로써 불필요한 실외 공기의 유입을 최소화하면서 적정 실내공기질을 유지할 수 있었다. 또한 각 열원에 따라 CADR이 두 시스템에서 증가하는 경향을 보이는데 이는 높은 열원에 의해 실외 공기량이 증가하였기 때문이다.

단일 열량 실험과 연속 열량 실험의 결과로 볼 때 실내 오염물질은 크게 두 가지 기전에 의해 제거 또는 감소됨을 알 수 있다. 첫째, 기계 환기 및 자연 환기에 따른 실외 공기의 유입에 의한 희석(dilution)기전과 둘째는 실내로부터 재순환되는 공기의 여과(filtration)기전이다. 이 두 기전은 환기 시스템의 성능과 종류에 따라

다르므로 적정 실내 공기질과 열적 쾌적성의 유지를 위해서는 환기 시스템의 선택이 매우 중요하다고 볼 수 있다. 각 시스템의 총감소율의 구성 요소를 최소화하여 희석과 여과의 개념으로 정의하면 다음과 같다.

$$K_{t,VAV} = K_m + K_n$$

$$K_{t,VAV,BPFS} = K_m + K_n + K_f$$

K_{t,VAV}는 VAV시스템 사용시의 오염물질 총감소율로서 기계 환기율(K_m)과 자연 환기율(K_n)로 구성된다. K_{t,VAV,BPFS}는 VAV/BPFS 사용시의 오염물질의 총감소율로서 기계 환기율(K_m), 자연 환기율(K_n), 공기 정화율(K_f)로 구성된다. 특히 기계 환기율 K_m은 실외 공기의 유입율로서 Table 2와 같다. 기계 환기율은 두 시스템 모두에서 실내 열에너지와 비례하여 증가하였다. 기계 환기율을 비교시 VAV/BPFS의 경우 기존 VAV시스템에 비해 기계 환기율이 약 25퍼센트 감소하였다. 이는 VAV/BPFS의 IAQ sensor의 기능에 의한 것으로 IAQ sensor는 시스템 자체의 냉방 효율을 극대화하고, 정화된 순환 공기를 재사용 함으로써 실외 공기의 유입량을 줄

Table 3. Average Percent Removal Effect on Indoor Aerosol Concentration

Experiment	Energy(W)	VAV System (%)		VAV/BPFS (%)		
		K_m	K_n	K_m	K_n	K_f
One energy load	400	85.9 ± 1.2	14.1 ± 0.5	22.2 ± 1.1	9.1 ± 0.5	68.7 ± 1.1
	800	86.2 ± 1.3	13.8 ± 0.4	23.9 ± 1.0	7.3 ± 0.6	68.8 ± 1.3
	1200	86.7 ± 1.1	13.3 ± 0.6	26.0 ± 1.0	6.3 ± 0.6	67.7 ± 1.1
	1900	88.8 ± 1.2	11.2 ± 0.5	26.5 ± 1.1	5.3 ± 0.5	68.2 ± 1.0

Experiment	Period	VAV System(%)		VAV/BPFS with HEPF ¹ (%)			VAV/BPFS with LEPF ² (%)		
		K_m	K_n	K_m	K_n	K_f	K_m	K_n	K_f
Stepwise increased energy load	Period 2	85.2±1.2	14.8±0.6	29.1±1.1	6.5±0.4	64.4±1.2	39.6±1.0	8.5±0.4	51.9±1.1
	Period 3	88.1±1.1	11.9±0.5	29.6±1.0	4.5±0.5	65.9±1.1	40.4±0.9	6.1±0.3	53.5±1.2

HEPF¹: High-Efficiency Particulate Filter
LEPF²: Low-Efficiency Particulate Filter

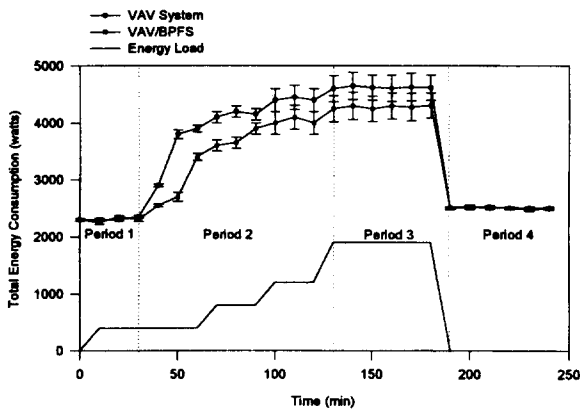


Fig. 4. The Comparison of Total Energy Consumption.

일 수 있기 때문이다.

Table 3은 각 시스템의 실내 에어로졸의 총감소율에 영향을 미치는 회석 및 여과기전의 기여도를 평가한 것이다. 기존 VAV시스템의 경우 실내 에어로졸 농도의 감소는 실외 공기에 의한 회석기전에 주로 의존함을 알 수 있으며, 총감소율의 85에서 89 퍼센트를 차지하였다. VAV/BPFS는 회석에 따른 실내 에어로졸 농도의 감소 효과는 22에서 27 퍼센트로 기존 VAV시스템에 비해 총감소율에 미치는 영향이 매우 적어지는 반면, 여과효과가 증대됨으로서 총감소율이 증가됨을 알 수 있었다. 특히 고효율 필터를 장착시에는 총감소율에 영향을 미치는 여과 효과의 기여도가 약 67 퍼센트, 저효율 필터 장착시에는 약 51 퍼센트로 열량의 변화와 상관없이 일정하였다. 즉 VAV/BPFS는 실외 공기의 유입에 따른 회석 효과를 최소화하고 여과 효과를 증대시킴으로써 실내 공기질을 보다 효율적으로 제어할 수 있었다.

3.3 에너지 소모량

Fig. 4는 시간에 따른 총에너지 소모량의 결과를 보여 준다. 총에너지 소모량은 fan의 에너지 소모량, chill water pump의 에너지 소모량과 chiller의 에너지 소모량의 합으로 구하였으며, 매 10분에 걸쳐 측정하였다. 실외 공기의 유입이 없는 period 1과 4에서는 두 시스템

간의 에너지 소모량의 차이는 없었다. 열량과 실내 오염원을 증가시킨 period 2와 3에서는 각 시스템의 총에너지 소모량이 chamber내의 열량과 비례하여 증가하였다. 이는 chamber내의 열량에 비례하여 실외공기의 유입량이 증가되었기 때문이다. 즉 새로이 유입된 실외 공기는 실내 공간으로 공급되기전 다시 냉방되어야 하므로 이 과정에서 환기 시스템은 에너지를 소모하게 된다. 따라서 각 환기 시스템의 에너지 소모량은 유입되는 실외 공기의 유입량 즉 환기량에 의존하며, 환기량의 증가는 환기 시스템의 chiller의 에너지 소모량을 증대시킴으로써 총에너지 소모량은 증대하게 된다. 본 연구에서 VAV/BPFS의 실외 공기 유입량은 기존 VAV시스템에 비해 약 25 퍼센트 이상 감소하였는데(Table 2) 이는 VAV/BPFS의 chiller의 에너지 소모량이 감소되었음을 나타낸다. 결과적으로 두 시스템간의 총에너지 소모량 비교시 VAV/BPFS가 기존의 VAV 시스템에 비해 약 15 퍼센트 감소하는 경향을 보여 주었다.

4. 결 론

실내환경에서 적정 실내공기질을 유지하면서 에너지 소모와 관련된 환기율을 동시에 제어하는 것은 매우 어렵다. 환기율의 증가는 실내 공기의 회석 효과를 증대시켜 적정 실내공기질을 유지하나 환기 시스템의 에너지를 증가시키는 단점을 가진다. 또한 실외 공기가 대기 오염에 의해 이미 오염되어 있는 경우에는 환기율의 증가는 실내 환경오염을 더욱 가중시키는 결과를 초래할 수 있다. 반면에 환기율의 감소는 환기 시스템의 에너지를 감소시키나 실내 공기질을 악화시킬 수 있다. 따라서 쾌적한 실내 공기질을 유지하기 위한 방법으로 filtration을 제안하고 있으며, 실외 유입 공기를 정화된 재순환 공기로 대체함으로써 에너지 소모량을 줄일 수 있는 방안으로 filtration이 권고되고 있다 (ASHRAE, 1989).

기존의 VAV시스템은 실내 공간의 열적 변화량에는 적절하게 대응하나, 실내의 유해 오염물질의 증가시 실내 공기질을 향상시키기 위한 특별한 제어 장치를 갖추지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서 사용된 VAV/BPFS는 실내의 열적 쾌적성을 유지하기 위해 이미 냉

방된 실내 공기를 재정화하여 실내에 공급하고 실외 공기유량을 줄임으로써 기존 VAV시스템에 비해 에너지 소모량이 적고 적절한 실내 공기질을 유지하는데 효율적임을 보여주었다. 본 연구로부터 얻은 구체적 결과는 다음과 같다. 첫째, VAV/BPFS는 환기율의 증가 없이 실내 에어로졸을 제거하는데 기존 VAV시스템보다 효율적이었다. VAV/BPFS의 실내 에어로졸 제거 효과는 사용된 필터 효율에 따라 달랐으며, 고효율 필터를 사용할 시 두 배 이상, 저효율 필터 사용할 때는 35 퍼센트 이상의 총감소율이 증가하였다. 또한 두 시스템간의 총감소율은 통계학적으로 유의한 차이를 보였다 ($\alpha=0.05$). 둘째, VAV/BPFS의 CADR은 기존 시스템에 비해 두 배 이상 증가하여 적정 실내공기질 유지에 적합하였다. 두 시스템간의 CADR은 통계적으로 유의한 차이를 보였다($\alpha=0.05$). 셋째, VAV/BPFS의 총 에너지 소모량은 기존의 VAV시스템에 비해 약 15 퍼센트 감소하였으며 통계학적으로 유의한 차이를 보였다($\alpha=0.05$).

본 연구의 비교 분석 결과 새로이 개발된 VAV/BPFS는 기존의 VAV시스템에 비해 실내 오염물질 농도의 감소와 에너지 절약에 효과적으로 작동하였다. 따라서 VAV/BPFS를 실내 공기 오염 제어의 한 전략으로 제공하고자 한다.

참 고 문 헌

ASHRAE Standard 62-1989., 1989, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta

Gardner, T.F., 1988, Part Ventilation Deficiencies in VAV System, Heating/Piping/Air Conditioning, 60, 89-100.

Georghlou, P.E., P. Blagden, D.A. Snow, L. Windsor and D.T. Williams, 1991, Mutagenicity of Indoor Air Containing ETS: Evaluation of a Portable PM-10 Impactor System, Environmental Science & Technology, 25, 8, 1496-1500.

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, 9, 16-25.

Hedge, A., T.D. Sterling, E.M. Sterling, D.A. Sterling and V. Nie, 1989a, Indoor Air Quality and Health in Two Office Buildings with Different Ventilation Systems, Environment International, 15, 115-128.

Hedge, A., P.S. Burge, A.S. Robertson, S. Wilson and B.J. Harris, 1989b, Work-related Illness in Offices: a Proposed Model of the Sick Building Syndrome, Environment International, 15, 143-158.

Koutrakis, P., S.L.K. Briggs and B.P. Leaderer, 1992, Source Apportionment of Indoor Aerosols in Suffolk and Onondaga Counties, New York, Environmental science & Technology, 26, 3, 521-527.

Lofroth, G., R.M. Burton, L. Forehand, S.K. Hammond, R.L. Seila, R.B. Zweidinger and J. Lwetas, 1989, Characterization of Environmental Tobacco Smoke, Environmental Science & Technology, 23, 5, 610-614.

Molhave, L., M. Thorsen, 1991, A Model for Investigations of Ventilation Systems as Sources for Volatile Organic Compounds in Indoor Climate, Atmospheric Environment, 25a, 241-249.

Moschandreas, D.J., J.W. Winchester, J.W. Nelson and R.M. Burton, 1979, Fine Particle Residential Indoor Air Pollution, Atmospheric Environment, 13, 1413-1418.

Moschandreas, D.J., 1985, Characterization of Indoor Air Pollution, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 21, 39-49.

Nelson, P.R., D.L. Heavner, B.B. Collie, K.C. Malolo and M.W. Ogden, 1992, Effect of Ventilation and Sampling Time on Environmental Tobacco Smoke Component Ratios, Environmental Science & Technology, 26, 10, 1909-1915.

Sexton, k., 1986, Indoor Air Quality: an Overview of Policy and Regulatory Issues, Science, Technology, 11, 11, 53-56.

Spengler, J.D., D.W. Dockery, W.A. Turner, J.M. Wolfson and B.G. Ferris, 1981, Long-term Measurements of Respirable Sulfates and Particles Inside and Outside Home, Atmospheric Environment, 15, 23-30.

U.S.DHHS (Department of Health and Human Services), 1986, The Health Consequences of Involuntary Smoking: a Report of the Surgeon General, Washington D.C. U.S. Government Printing Office, No CDC/87/8398.

Von Dongen, J.E., J.C. Phaff, 1989, Ventilation Behavior and Indoor Air Problems in Different Types of Newly Built Dwellings, Environment International, 15, 1-6.

World Health Organization, 1983, Indoor Air Pollutants: Exposure and Health Effect, Copenhagen, WHO regional Office for Europe, EURO reports and studies NO.78.