

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 25, No. 4, 2005

환기에 의한 실내 부유오염입자 제거특성에 관한 실험적 연구

강태욱*

*LG전자 에어컨 연구소(twkang@lge.com)

Experimental Study on Removal Characteristics of Indoor Suspended Particulates by Ventilation.

Kang, Tae-Wook*

*Air-conditioning Laboratory, LG Electronics (twkang@lge.com)

Abstract

In this paper, the ventilation performance of suspended particulates in indoor side was investigated by step-down method. Experiments were performed in function of mechanical ventilation types and locations of supply and extract air. The type 2 ventilation system shows the highest removal characteristics rather than other 2 types. It means that the displacement ventilation has also good decay rates of concentration compared to mixing ventilation.

Keywords : 환기방식 (Ventilation Type), 감쇄율(Decay rate), 부유분진(Suspended particulates), 혼합환기 (Mixing ventilation), 변위환기(Displacement ventilation)

기 호 설 명

ACH: 시간당 환기 횟수(#/hr)
C : 농도(ppm)
C(0): 초기 농도(ppm)
 λ : 감쇄율
Q : 풍량 (m^3/h)

t : 시간 (sec)
V : 실체적(m^3)

1. 서 론

최근 들어 대기오염과 더불어 실내 공기 오염의 문제가 심각하게 대두되고 있다. 특히 실내에

서 생활하는 시간이 길어지고 실내오염원의 다양화, 에너지 절약을 위한 건물의 기밀화 등에 의해 실내 공기질의 중요성은 더욱 증가하고 있다.⁽¹⁾ 실내를 오염시키는 입자상의 물질은 실내 활동에 의하여 발생되는데 예를 들면 요리, 청소, 흡연, 페인트 칠, 화장할 때 입자물질이 공기중으로 떠오르는 것이다. 가스상 물질과는 달리 실내에 부유하는 입자상 물질은 호흡과 함께 재실자의 폐포로 흡입되어 장기간 잔류하는 경우가 많기 때문에 실내에서는 이를 특별히 관리해야 한다. 현재 우리가 생활하고 있는 실내 공간 내에는 환기장치가 설치되어 실내공기 중의 오염물의 농도가 적절히 제어되어야 하나⁽³⁾ 환기장치가 적절히 선정되지 않거나 건물의 기밀화로 자연환기도 미흡한 경우가 많다.

실내에서는 외기와와의 온도차에 따라 공기의 밀도가 달라지므로 공기의 유출입이 생길 수 있으며 바람의 영향에 의해서도 자연환기가 될 수 있다. 그러나 자연환기만으로는 언제나 안정된 환기를 얻을 수 없으므로 송풍기를 이용한 기계적 힘을 의해 확실한 환기량을 확보하는 경우가 많다.⁽⁴⁾ 이러한 기계 환기설비에 의한 환기가 실제로 실내에서 발생된 오염물의 회색 및 제거에 나타내는 성능은 도입된 외기가 실내의 공기와 혼합하는 정도에 따라 정해지는데 환기방식이나 환기량, 급배기구의 상대적 위치 등에 따른 실내공기의 유동양식에 크게 영향을 받는다.

본 연구에서는 단순화된 축소 전체 환기 모형실을 제작하여 환기방식에 따른 오염입자제거특성을 급배기구 위치 및 환기횟수를 변수로 실험적으로 파악하고자 하며 실내공간에 대한 환기장비를 계획할 때 도움이 되는 기초 자료를 얻고자 하며, 시험분진으로 석탄회(Fly ash)를 이용하여 체강법(Step-down method)으로 오염입자제거특성을 평가하였다.

2. 환기방식

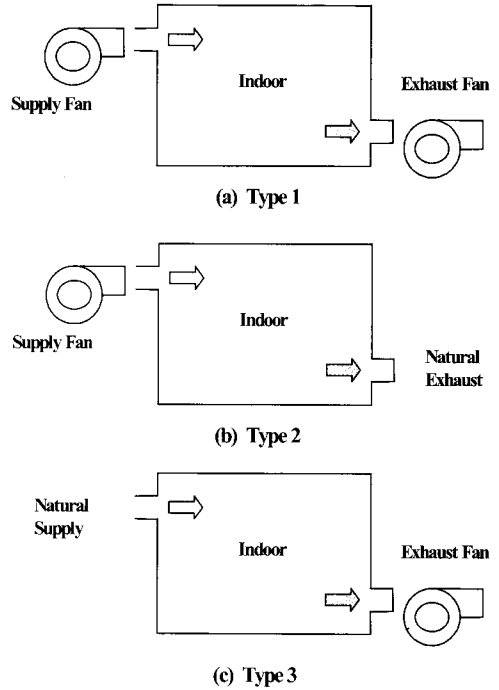


그림 1. 환기방식

2.1 기계환기 방식

급기팬과 배기팬을 이용하여 강제적으로 외기를 실내로 받아들이고 오염공기를 실외로 배출하는 환기방식을 기계환기 또는 강제환기라고 한다. 이 방식은 환기량을 제어할 수 있을 뿐 아니라 공기 여과기를 설치해서 실내로 급기되는 공기질을 제어할 수 있는 등 많은 이점이 있으므로 환기에는 주로 기계 환기방식이 채용되고 있다. 그림 1은 대표적인 기계환기 방식을 나타내는데 송풍기의 이용방법에 따라 환기방식을 분류할 수 있다.

2.2 농도감쇄특성

체강법(Step-down method)를 사용하여 환기에 의한 실내 오염물의 농도변화를 측정하면 실내

오염물의 농도는 시간에 따라 지수적으로 감소하며 그 식은 다음을 따른다.

$$C(t) = C(0)e^{-\lambda t}$$

여기서 λ 는 오염물의 감쇄율을 나타내며 λ 값이 클수록 실내에서 오염물의 농도감소가 빠르며 환기 횟수($\frac{Q}{V}$)와 실내 유동에 크게 영향을 받는다.⁽⁵⁾

체강법에서 $C(0) = C_{max}$ 이므로 C_{max} 를 좌변으로 옮기고 농도 변화식을 선형화하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{C(t)}{C_{max}}\right) = -\lambda t$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

그림 2는 본 실험에 사용된 단순화된 축소 전체 환기 모형실의 구성도를 나타낸다. 가로 0.84m, 세로 0.68m, 높이 0.7m로서 직사각형의 거주공간을 모형화 하였다. 모형에서 급기구는 천장, 측면 상단, 측면 하단에 설치하였고 급기구에는 급기된 공기의 확산효과를 높이기 위해 Grid를 설치

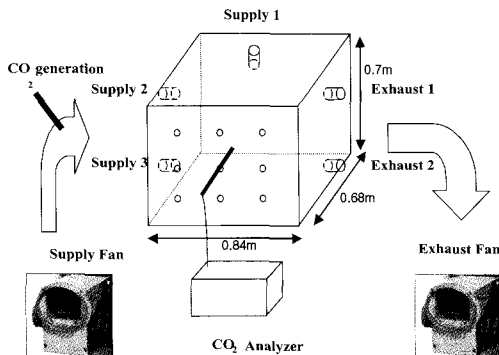


그림 2. 환기 모형실

하였다. 오염입자 제거실험은 환기방식에 따라 실내에 존재하는 오염입자의 거동특성을 파악하는 것으로 시험분진을 이용한 시간에 따른 분진농도의 감소정도를 측정하여 평가하였다. 시험분진의 농도 측정에 사용한 입자측정기(FE-80 Particle Counter)는 빛을 비추어 나타나는 전방산란(forward scattering)을 통해 입자의 크기 및 개수농도를 측정하는 장비로 측정가능한 입자크기 범위는 $0.3\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$ 이다. 이 기기는 부유입자의 측정에 적당하므로 에어로졸 연구, 대기오염, 산업위생, 청정공기모니터링 등에 응용된다. 오염입자 제거실험을 위해 사용된 시험분진은 비중 2.3g/cc 의 Fly Ash를 사용하였다. Fly Ash는 JIS규격 10종 분진으로 고성능의 여진장치, 집진장치의 성능시험용으로 많이 사용되고 있다.

오염입자제거실험은 모형실내 중앙지점에서 실시하였으며 1분의 시간간격으로 15분 동안 측정하였다. 측정되는 입자크기는 대기중 호흡성 분진의 크기인 $1 \sim 5\mu\text{m}$ 로 설정하였다. 오염입자 제거실험은 환기횟수(6ACH, 8ACH, 10ACH, 12ACH)별로 실험을 하여 환기횟수 증가에 따른 오염입자제거특성을 비교하였고 급/배기구 위치별로 환기방식의 영향을 분석하였다.

3.2 실험방법

오염입자제거특성 평가를 위한 실험방법은 다음과 같다.(6)

- ① 급기팬 및 배기팬을 연결하여 모형실내의 공기를 순환시킨다.
- ② 주입되는 시험분진이 모형실내 공기와 고르게 혼합될 수 있도록 모형실내에 급, 배기장치를 폐회로로 최대 유량으로 공회전 작동시켜 모형실내 공기와 균질하게 혼합한다. 이때 측정기를 이용하여 공간적으로 균질한 상태가 확인될 때까지 운전시킨다.
- ③ 실험조건에 맞는 환기횟수로 설정한다.
- ④ 일정시간간격으로 시험분진 농도를 측정한다.

⑤ ①에서 ④까지의 반복하여 측정한다.

라 오염입자의 농도감소가 빨라진 것과 일치한다.

표 1. 실험조건

Symbol	Meaning
Type1	mechanical inlet and extract
Type2	mechanical inlet and natural extract
Type3	natural inlet and mechanical extract
Case2	upper supply down extract
Case3	down supply upper extract
6ACH	6/hr
8ACH	8/hr
10ACH	10/h
12ACH	12/h

4. 실험결과 및 고찰

오염입자 제거실험은 환기방식에 따라 실내에 존재하는 오염입자의 거동특성을 파악하는 것으로 시험분진을 이용하여 시간에 따른 분진농도의 감소정도를 측정하여 평가하였다.

4.1 예비실험

그림 3은 모형실내 오염입자의 자연 감소정도를 나타낸다. 시간에 따라 오염입자의 감소는 적어 자연 감소에 의한 영향은 무시할 수 있다.

그림 4는 측정위치에 따른 오염입자의 초기 농도를 나타내는 것으로 오염입자가 모형실내에 전체적으로 고르게 분포함을 알 수 있다. 그림 5는 환기횟수의 증가에 따른 오염입자제거특성을 나타낸다. 환기횟수(6ACH, 8ACH, 10ACH, 12ACH)별로 실험을 하여 환기횟수 증가에 따른 오염입자제거특성을 비교하였다. y축은 시간에 따른 오염입자의 개수 농도를 최대개수농도로 나누어 무차원화 하였다. 실험결과 환기횟수가 6회, 8회, 10회, 12회로 증가할수록 오염입자는 빨리 제거되었으며 이러한 결과는 환기횟수 증가에 따

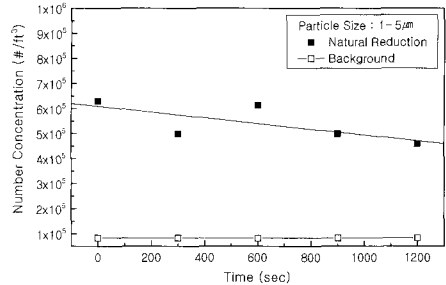


그림 3. 입자농도의 자연감쇄(1~5 μ m)

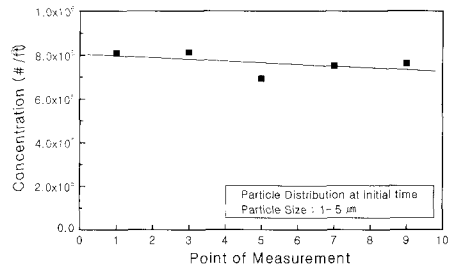


그림 4. 모형실내 입자농도의 분포 측정

4.2 환기방식에 따른 오염입자 제거특성

오염입자 제거실험은 환기방식별 특성을 파악하기 위해 환기방식별로 실시하였다. 급기구와 배기구의 위치는 상부급기, 하부배기(Case 2)와 하부급기, 상부배기(Case 3)에 대해 실시하였는데, 상부급기, 하부배기의 형식은 혼합유동을 형성하고 하부급기, 상부배기의 형식은 변위환기의 전형적인 급배기방식으로 두가지 방식 모두 실전체를 가로지르는 유동으로 국부적인 단락이 발생하는 급배기방식에 비해 높은 환기효율을 가진다. 본 연구에서는 대표적인 두 환기방식에 대해 오염입자 제거특성을 비교하였다.

그림 6은 환기방식 별로 Case 2와 Case 3의 입자제거효율을 비교한 그림이다. 환기방식에 따른 오염입자제거효율은 강제급기, 자연배기의 Type 2 환기방식에서 우수하며 Type 1, Type 3 중 환

기방식의 순으로 나타났다.

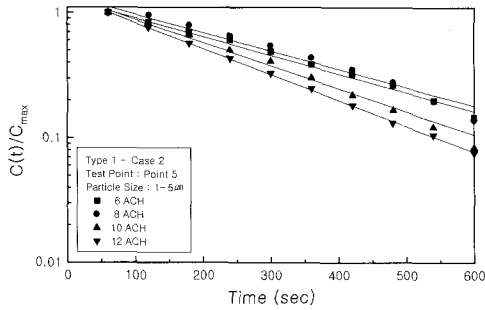


그림 5. 환기횟수에 따른 오염농도 감소

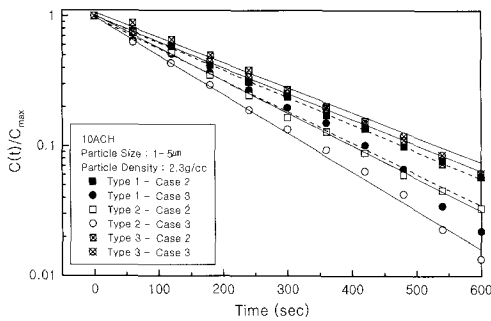
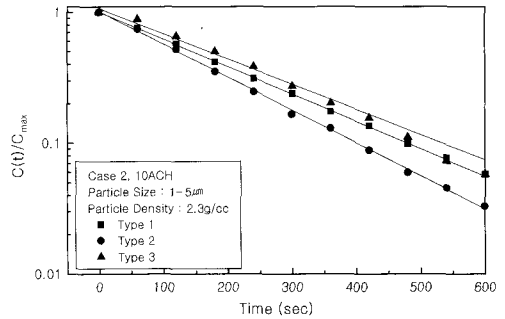


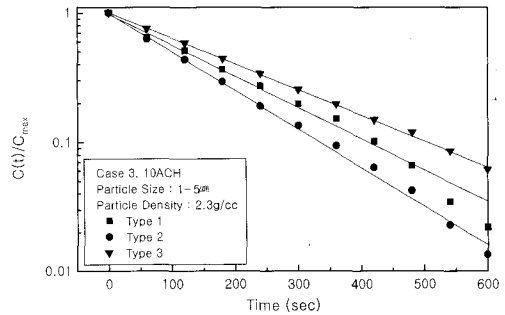
그림 6. 입자제거 효율(case 1, case 2)

그림 7은 Case 2와 Case 3의 각각에 대해 환기방식별로 비교한 그림으로 Case 2와 Case 3의 두 경우 모두 Type 2 에서 높은 오염입자 제거효율을 나타냈다. Type 2 는 강제급기, 자연배기 형식의 환기방식으로 실내를 양압으로 유지하여 고압의 급기구에서 저압의 배기구로 일방향 유동을 형성하므로 오염물의 혼합을 약화시켜 나은 효율을 나타내며 실외의 오염물이 실내로 침입하지 않기 때문에 수술실이나 클린룸과 같은 청정실에 채용되는 환기방식이다.

표 2는 Case 3의 오염입자의 감쇄율을 표로 나타낸 것이다. Case 2가 Case 3보다 감쇄율이 높음을 나타내고 있다. 그림 8은 Case 2와 Case 3의 오염입자 제거특성을 비교한 것으로



(a) Case 2



(b) Case 3

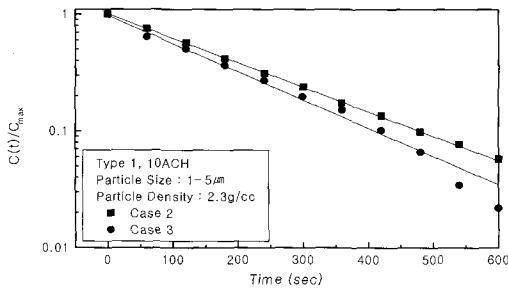
그림 7. 환기 방식에 따른 입자농도 비교(10 ACH)

표 2. 부유입자 농도의 감쇄율

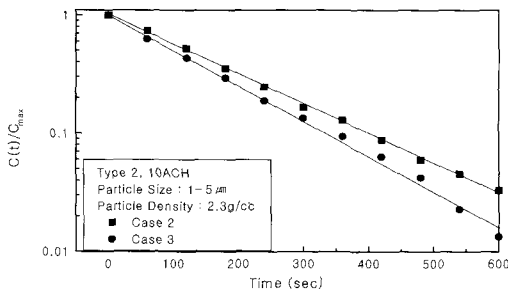
	Type 1	Type 2	Type 3
Case 2	0.0028	0.0047	0.0032
Case 3	0.0041	0.0052	0.0033

Case 3의 경우가 Case 2보다 오염입자 제거특성이 향상되었다. Case 2와 Case 3의 오염입자 제거특성 차이는 급배기구 위치에 따른 Case 별 유동패턴의 차이로 설명할 수 있다. 급배기구 위치에 따른 환기형태는 크게 혼합환기와 변위환기로 나눌 수 있다. 혼합환기는 일반적으로 상부에서 급기하는 방식으로 유입된 외기가 서로 섞여 전체적으로 혼합된 후 배출되는 유동형태를 가진다. 혼합 환기방식일 경우 부유하는 오염물은 공기유동과 함께 전체적으로 혼합된 상태에서 배기

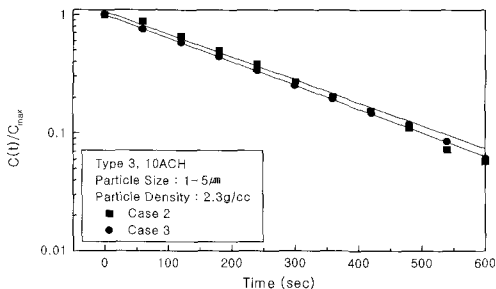
구를 통해 외부로 제거된다.



(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3

그림 8. 케이스 별 부유입자의 농도(10 ACH)

혼합 환기방식에 비해 변위환기는 유입된 외기가 실내에서 혼합되는 것을 최소화시키는 환기방식으로 하부로 급기되며 상부에 위치한 배기구를 통해 배기된다. 이와 같이 변위환기에서 혼합이 최소화되는 이유는 급기공기와 실내공기의 온도차에 의한 성층화 때문이다. 실내공기보다 온도가

낮은 공기가 유입되면 유입된 외기는 온도차이 때문에 바닥으로 넓게 퍼지게 된다. 바닥으로 유입된 외기는 실내에서 발생하는 열원에 의해 데워져 차츰 상승하게 되며 이로 인해 전체적인 공기유동의 방향은 상부로 향하게 되어 혼합이 최소화된다. 변위환기에서 부유하는 오염물은 공간전체로 혼합되지 않고 유동을 따라 상부로 이동하여 배기구를 통해 배출된다.(10,11)

본 연구에서 사용된 Case 2는 상부급기, 하부 배기의 형식으로 혼합 환기의 특성요소가 크며 Case 3의 경우 하부급기, 상부배기의 형식으로 변위환기의 요소가 크므로 이와 같은 환기형태의 차이에 의해 Case 3에서 오염물제거특성이 Case 2에 비해 향상되었음을 설명할 수 있다. 변위환기의 경우 공급공기와 실내공기의 온도차에 따라 영향을 받는데 본 연구에 사용된 환기 챔버의 유입외기와 실내공기의 온도를 측정된 결과 약 1°C정도의 온도차를 가지며 공급공기의 온도가 낮았다. 실내공기의 온도를 높이는 열원은 여러 가지가 있으며 Sandberg(1996)는 변위환기에서 유입외기를 데우는 열원으로 벽면으로의 복사열과 히터나 사람과 같은 내부열원, 그리고 공기와 밀도가 다른 오염물의 역동적인 움직임에 의한 열전달 등을 설명하였다. 본 연구에서는 의도적으로 실내보다 온도가 낮은 공기를 공급하지는 않았으나 사용된 환기 챔버의 벽면을 단열한 등은 (Isothermal)조건이 아니며 앞서 제시한 여러 가지 주위 열원으로부터 영향을 받아 실내외의 온도차이가 발생하였다고 생각된다. 이러한 효과로 인해 하부급기, 상부배기의 Case 3에서 변위환기방식과 같이 Case 2에 비해 오염입자의 혼합을 약화시켜 오염물제거에 도움이 되었다. 따라서 오염입자는 실내에서 유동에 따라 혼합되는 혼합 환기방식에 비해 비교적 혼합 없이 배기구로 빠져나가는 Case3에서 실내오염물제거효율이 향상됨을 알 수 있다.

5. 결 론

전체환기 모형실을 이용하여 환기방식에 따른 환기효율을 환기횟수 및 급/배기구 위치별로 실험한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 환기방식별 오염입자제거특성을 분석한 결과 환기횟수가 6회, 8회, 10회, 12회로 증가할수록 오염입자는 빨리 제거되었으며 이러한 결과는 환기횟수증가에 따른 오염입자 농도 감소율의 증가와 일치한다.
- (2) 혼합 환기와 변위환기의 대표적인 형식인 Case 2(상부급기, 하부배기)와 Case 3(하부급기, 상부배기)별로 오염입자 제거특성을 분석한 결과 Case 3의 경우가 Case 2보다 오염입자 제거특성이 향상되었다. 환기방식별로 비교한 결과 강제급기 자연배기의 Type 2에서 오염입자제거특성이 우수하였다.
- (3) 단순화된 모형실을 이용하여 환기방식에 따른 환기특성을 분석한 결과 환기효율과 오염입자 제거특성이 Type 2에서 우수한 것으로 나타났다. 그러나 Type 2 환기방식은 급배기의 조절에 의한 혼합유동인 Type 1 환기방식과 달리 내부 양압에 의한 변위환기특성이 강해 쾌적성 측면에서는 오히려 불리하다. 따라서 Type 2 환기방식은 뛰어난 환기효율과 오염물 제거성능을 이용하여 클린룸과 수술실과 같은 고정정이 요구되는 특수공간에서 적용되는 것이 바람직하다.

참 고 문 헌

1. 한화택, 1998, "추적가스를 이용한 바닥취출 공조공간내의 환기효율 측정실험", 공기조화 냉동공학 논문집, 제10권 제 5호, pp. 610~618
2. 한화택, 1999, "배기구 위치 및 풍량 변화에 따른 실내환기효율의 측정실험", 공기조화 냉동공학 하계학술발표회 논문집, pp.372~378
3. 김신도, 1993, "실내환기효율의 공간적 변화 특성에 관한 연구", 대한대기보전학회지 Vol. 9, No. 3, pp.236~241
4. Bjarne W. Olesen, 1994, "Evaluation of a Vertical Displacement Ventilation System". Building and Environment, Vol. 29, No. 3, pp. 303~310
5. 강태욱, 2002, "전체환기 모형실에서 환기방식에 의한 환기효율 특성 및 룸 에어컨에 의한 환기공조부하 특성에 관한 연구", 부산대학교 박사학위논문
6. 이정주, 1994, "전체환기 모형실을 이용한 실내 공기질 평가에 관한 연구". 서울시립대학교 박사학위논문
7. R. Hasebe, 1996, "Ventilation Performance and Thermal Comfort for Displacement Ventilation System in Office Space". Indoor Air 96 I, PP. 823~828
8. 이춘식, 1994, "실내환경 쾌적성 평가방법에 관한 연구". 한국과학기술원 보고서, pp. 137~163
9. ASRAE, 2005, "Fundamentals of ASHRAE Handbook", American society of heating, refrigerating and air-conditioning, chapter 27 Ventilation and Infiltration.
10. ASRAE standard, 2001, "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality" American society of heating, refrigerating and air-conditioning.