

실내형 공기청정기의 부유분진 제거효율평가

Evaluation of Air Cleaner Efficiency for Removing Particulate

윤 동 원
 경 원 대 학 교
 건 축 설 비 학 과 / 교 수

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate air-cleaner as to its effectiveness in removing tobacco and incense smoke particulates within a clean chamber, which was installed with 6 HEPA filter units. The measurement elements included the concentrations of air-borne particulate, carbon monoxide(CO), nitrogen oxides(NOx) and the infiltration rate in clean chamber. On testing air-conditioning systems of clean chamber were not operated, none of system was effective at gaseous contaminants, and entrance was sealed. As a result, it was found that the effectiveness of the indoor air cleaner was considerable for removing particulate. The efficiency of air-cleaner was improved as air flow rate was increased.

1. 머리말

최근 심각한 대기오염과 더불어 실내의 공기환경에 대한 관심이 높아지고 있으며, 에너지 절약을 위하여 건물은 점차로 단열화, 기밀화되고 있다. 한정된 실내공간에 오염된 공기가 계속 정체되면, 각종 오염물질의 농도가 증가하여 실내의 공기환경이 악화될 수 있다.

대부분의 시간을 실내에서 생활하는 재실자의 건강과 작업능률의 향상을 위하여 쾌적한 실내환경을 조성하여야 하며, 실내에서

방출되는 각종 오염물질을 제거하거나 희석하기 위하여 환기설비가 채택되고 있다. 실내의 오염물질을 제거하기 위한 환기의 필요성과 이로 인한 에너지의 소비, 에너지 소비 절감을 위한 환기량의 제한에서부터 발생되는 불쾌적감의 증가와 같이 서로 상반된 요구가 대두되고 있다.

실내에서 생활하는 재실자의 활동이나 실내의 흡연, 연소기구의 사용, 사무용 기기나 건축자재의 마모와 열화에 의하여 많은 양의 부유분진이 방출되며, 또한 외부로부터 많은 양의 분진이 유입되어 실내 공기를 오염시키

고 있다. 이러한 부유분진을 효과적으로 제거하고 거주 영역내의 공기오염을 제어하기 위한 수단으로 공기청정장치를 채택하여 왔다. 주로 공기조화기 내부에 에어 필터를 장착하여 순환공기나 외기 중의 부유분진을 제거하는 방법과 실내에 단독으로 설치되는 공기청정기가 보급되어 왔다. 실내형 공기청정기는 실내에서 부분적으로 발생하는 각종 연기나 유해가스, 부유분진과 악취를 효과적으로 제거할 수 있도록 고안되어 널리 보급되고 있으며, 환기량을 경감시켜 에너지 절약에 효과적인 기기로 평가되고 있다. 최근 공기환경의 중요성이 대두되면서 실내형 공기청정기의 사용이 증가되고 있으나 기기의 효율이 정량적으로 평가되지 않은 상태에서 무분별하게 개발되어 보급되고 있는 실정이다.

우리 나라에서는 아직까지 실내형 공기청정기의 효율을 평가하기 위한 방법이 정립되지 않은 상태로 단순히 기기 내부에 장착된 에어필터만의 제진효율을 제시하는 경우가 대부분이어서 기기의 종합적인 효율을 파악하지 못하고 있는 실정이나, 공기청정기의 효율은 오염원의 강도, 오염원의 종류, 순환공기량 등 물리적변수 들과 심리적인 변수들의 복잡한 조합에 의해 결정된다. 따라서, 본 연구에서는 HEPA 필터가 장착된 공기청정기를 대상으로 부유분진에 대한 제거효율을 평가하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 입자상 물질과 실내환경에의 영향

2.1 공기 오염물질의 종류

실내의 오염물질은 재실자의 활동과 흡연, 연소기구, 건축자재 등에서 주로 발생되며,

실내 공기를 적절한 방법에 의하여 제어하지 않을 때에는 재실자에게 불쾌감을 유발하고, 특히 오염농도가 높을 경우에 장시간 체류하는 재실자에게 건강에 유해한 영향을 미칠 수 있다. 그림 1은 유해한 공기 오염물질을 나타낸 것으로 가스상 물질과 입자상 물질로 분류할 수 있다.

2.2 부유분진의 종류 및 특성

분진이라 함은 대기중에 부유하거나 비산강하하는 미세한 입자상 물질을 말하는데, 입자상 물질이란 물질의 파쇄, 선별, 퇴적, 이적 기타 기계적 처리 또는 연소, 합성, 분해시 발생하는 고체상이나 액체상의 미세한 물질로서 분진, 매연, 검댕 및 액적 등을 말한다. 분진은 크게 강하분진과 부유분진으로 분류할 수 있다. 강하 분진은 입자가 크고 무거워서 침강하기 쉬운 분진이며, 부유분진은 입자가 미세하고 가벼워서 좀처럼 침강하기 어려운 분진을 말한다. 일반적으로 분진의 입경은 $0.001 \sim 150 \mu\text{m}$ 로 나타나며 이 중에서 입자의 크기가 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 정도이고, 인체에 유해한 호흡성 분진(RSP : respirable suspended particulates)을 PM-10 (particulate matters less than $10 \mu\text{m}$ as an aerodynamic diameter)으로 분류한다. 이러한 크기의 입자는 침강 속도가 느리고, 대기 중에 비교적 장시간 체류하며 사람이 호흡할 때 폐의 기관지 또는 폐포 부위에 침착되기 쉬운 경향이 있어 호흡기에 영향을 미친다.

분진은 대부분이 호흡 기관을 통하여 인체에 흡입된다. 호흡 기관내 침투하는 결정적 요건은 입자의 크기인데, 인체에 가장 유해한 입경은 $0.5 \sim 5 \mu\text{m}$ 범위이며, 특히 $2 \sim 4 \mu\text{m}$ 의

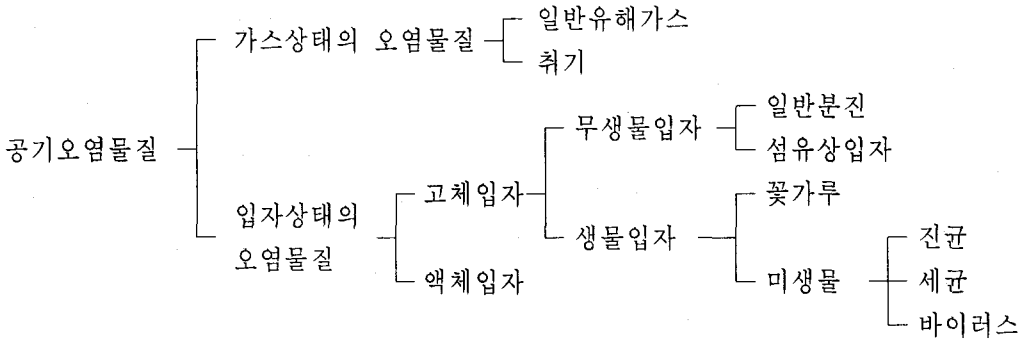


그림 1 공기오염물질의 분류

범위에서 침착률이 가장 크다. 또한, 천천히 흡입할 때 그 침착률은 증가한다. 1~10 μ m 정도의 입자는 침전, 빛의 분산 현상 및 시야를 방해하는 역할이 커지는데 0.1~1 μ m의 범위는 특히 시정에 영향을 미친다. 매연 등의 입자상 물질은 타 오염 물질(가스상)을 운반하는 작용을 하므로 피해의 양상은 더욱 가중된다. 산업장이 아닌 일반 실내 건물에서의 분진의 인체 영향은 실내 흡연, 환기 상태 등에 따라 달라질 수 있고, 거주자의 건강 상태에 따라 나타나는 반응도 다르게 나타난다.

2.3 부유분진의 제거효율

실내형 공기청정기의 분진 효율을 평가하기 위해서는 그림 2와 같이 소형 공기청정기의 실험에 적합한 규모의 실험실이 필요하다. 공기청정기의 분진 포집효율을 평가하기 위하여 실험이 진행되기 전에 실험실 내부는 부유분진을 완전히 제거하여 청정한 상태로 유지하여야 한다.

공기청정기의 제진효율을 평가하기 위하여 실험용 분진을 발생시키고, 단위시간(dt)에 변화하는 분진의 농도(dC)를 측정하여 실내

의 오염물질에 대한 다음과 같은 평형식을 유도할 수 있다.

$$\{(p \cdot C_0 \cdot Q + C_0 \cdot Q_{ns} + M + p_a \cdot C \cdot Q_a) - (C \cdot Q_i + C \cdot Q_{nr} + C \cdot Q_a)\} \cdot dt = V \cdot dC$$

..... (1)

여기서, 측정실의 상태를 다음과 같이 유지하면 식(1)을 단순화하여 표시할 수 있다.

- 측정실의 내부압력을 정압(+)으로 유지한다. ($Q_{ns}=0$)

- 측정실의 기밀성능을 높인 구조로 한다. ($Q_{nr}=0$)

- 공기 순환장치에 고성능 필터(HEPA filter 또는 ULPA filter)를 사용한다. ($p=0$)

또한, 실험실 내부의 오염농도를 고농도로 유지하고, 오염물질의 발생을 정지($M=0$)시키면 실내의 오염물질의 농도(C)는 초기의 농도(C_i)로부터 시간 t후에 다음과 같이 표시된다.

$$C = C_i \cdot \exp\left\{-\left(1 - p_a\right) \cdot Q_a - \frac{Q}{V}\right\} \cdot t$$

..... (2)

식(2)를 전개하면 다음과 같이 공기청정기의 포집효율 η_u 를 선정할 수 있다.

$$(1 - p_u) = - 2.303 \cdot \frac{V}{Q_u} \cdot t \times \log \frac{C}{C_1} - \frac{Q}{Q_u} \dots \dots \dots (3)$$

$$\eta_u = (1 - p_u) \times 100 \dots \dots \dots (4)$$

- 여기서, Q : 환기장치의 급기량
- p : 환기장치의 오염물질 통과율
- Q_r : 환기장치의 배기량
- Q_{ns} : 자연환기에 의한 급기량
- Q_{nr} : 자연환기에 의한 배기량
- Q_u : 소형공기청정기의 송풍량
- C_o : 외기오염물질량
- p_u : 소형공기청정기의 오염물질 통과율
- C : 실내오염물질량
- V : 실체적
- M : 실내오염원

3. 측정개요

3. 1 실험실(Clean Chamber)의 개요

본 실험은 경원대학교에 설치되어 있는 인공기후실을 이용하였다. 실험용 챔버의 실체적은 27.85m³이고, 실내의 청정도를 유지하기 위하여 고성능 HEPA 필터가 부착된 천장 취출형 FFU (fan filter unit) 방식을 채택한 클린룸형의 인공기후실이다. 표 1은 실험실의 개요를 설명한 것이며, 그림 2는 공조방식의 계통도를 나타낸다.

실험을 실시하기 전에 인공기후실의 공조장치를 충분히 가동하여 온도와 습도를 일정

표1. 실험실의 개요

| 실험장치 | 항목 | 개요 |
|--------|---------|--|
| 인공기후실 | 크기 | 4.51(L) × 2.5(W) × 2.47(H) = 27.85m ³ |
| | 내장재료 | 무정전 복합판넬 |
| 공기청정장치 | 전치필터 | 공조기에 설치 |
| | HEPA 필터 | 실내천정 부착형 FFU형 HEPA 필터 |
| 환기장치 | 환기성능 | 순환공기 처리와 외기도입 |

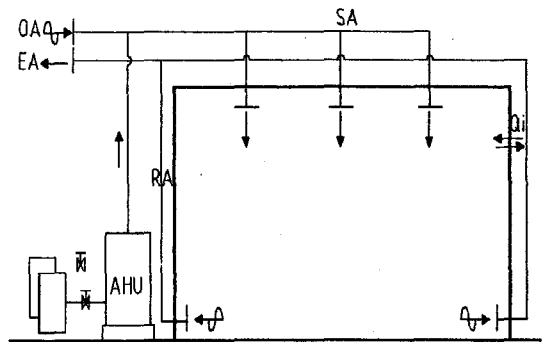


그림 2 실험실 공조방식의 개략도

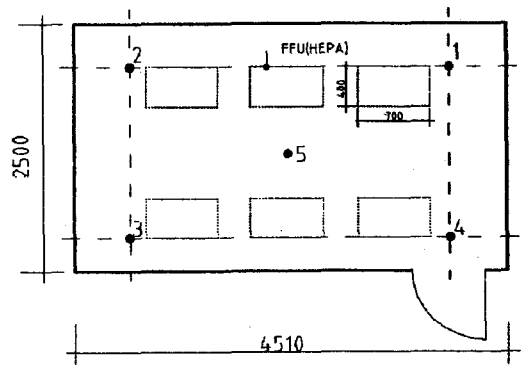


그림 3 인공기후실내 측정지점

하게 유지시켰으며, 내부의 부유분진을 완전히 제거하였다. 공기청정기의 효율을 평가하기 위한 실험 도중에는 공조장치의 작동을 정지한 상태에서 소형 공기청정기 외에는 어떠한 종류의 공기청정기도 사용하지 않았다. 각 실험이 끝난 뒤에는 공조장치를 작동하여 남아 있는 분진을 완전히 제거한 후 재실험을 실시하는 방법으로 실험을 진행하였다. 실험이 진행되는 동안에는 틈새바람을 차단하기 위하여 인공기후실의 입구와 출구를 밀폐시켰다. 틈새바람 등에 의한 자연환기량은 SF₆가스를 트레이서 가스로 사용하여 농도감쇠법에 의하여 측정하였다.

그림 3은 측정지점을 나타낸 것으로, 공기청정기는 출입구로부터 가장 먼 측정점②에 놓았다. 또한, 부유분진은 측정점①부터 측정점③까지 측정되었고, CO 가스와 SF₆ 가스농도는 측정점①부터 측정점⑤까지 측정되었으며, NO_x 농도는 측정점⑤에서만 측정되었다.

3.2 실험용 공기청정기

필터식 소형 공기청정기에는 오염물질을 제거하기 위해서 에어필터와 송풍기로 구성되어 있다. 본 실험에서 사용된 소형 공기청정기는 I사의 제품으로 에어필터는 고성능 HEPA 필터와 전치필터로 활성탄필터(Carbon Filter)를 사용하고 있다. 유해가스의 제거능력은 없으나, 활성탄 필터를 사용하여 약간의 냄새 제거를 위한 탈취 능력을 보유한 것으로 사료된다. 송풍량은 실내오염물질 제거 능력에 영향을 미치기 때문에, 소형 공기청정기의 성능을 고려하는 데 송풍기의 성능을 측정하는 것이 중요하다. 본 실험에서는 공기청정기의 송풍량을 열선 풍속계를 사용하

여 공기청정기의 출구 풍속을 측정하여 송풍량을 환산하였다. 실험대상 공기청정기의 송풍량은 3단계로 조정할 수 있으며, 각각의 송풍량은 1.61[m³/min], 1.87[m³/min], 1.92[m³/min]로 측정되었다. 또한, 표 2는 공기청정기의 제원을 나타낸다.

표 2. 공기청정기의 제원

| 제반사항 | 성능 |
|-------|------------------------------------|
| 정화기능 | 4평 실내에서 시간당 6회 이상 환기 |
| 최대송풍량 | 85cfm(약 2.407 m ³ /min) |
| 크기 | 37cm(지름), 24cm(높이) |

3.3 측정항목 및 기기

실험은 1998년 3월 7일과 3월 8일 2일간 실시되었고, 실험에 사용된 분진은 담배연기와 향 연기를 이용하였으며, 그림 4는 본 실험에 적용한 실험 스케줄을 나타낸 것이다. 또한, 표 3은 측정항목 및 기기를 나타낸다. 연소에 의해 발생하는 오염물질 중 NO_x와 CO 가스 농도를 측정하였다. CO가스는 Multi-gas Monitor와 Multipoint Sampler & Doser를 사용하여 각 측정점에 연결된 튜브를 통하여 자동측정하였다. 또한, NO_x는 화학발광식 NO/NO₂/NO_x 분석기를 이용하여 측정하였다.

4. 결과분석 및 고찰

4.1 흡연 향 연소에 의한 오염물질

(1) 오염물질의 발생특성

담배의 연소에 의하여 발생하는 오염물질은 크게 부유분진과 가스상의 물질로 구분된

표 3. 측정항목 및 기기

| 항 목 | 측 정 기 기 | | 측정점 |
|-----------------|--|--------------|----------------------------------|
| | 측정기기명 | 측정원리 | |
| CO 가스 환기량 | Multi-Gas Monitor Multipoint Sampler & Doser | 적외선 선택흡수식 | 측정위치-측정점①~측정점⑤ 측정높이-바닥위 110cm |
| NO _x | NO _x Analyzer | 화학발광식 | 측정위치-측정점⑤ |
| 부유분진 | 디지털 분진계 | 광산란식 | 측정위치-측정점①~측정점③ |

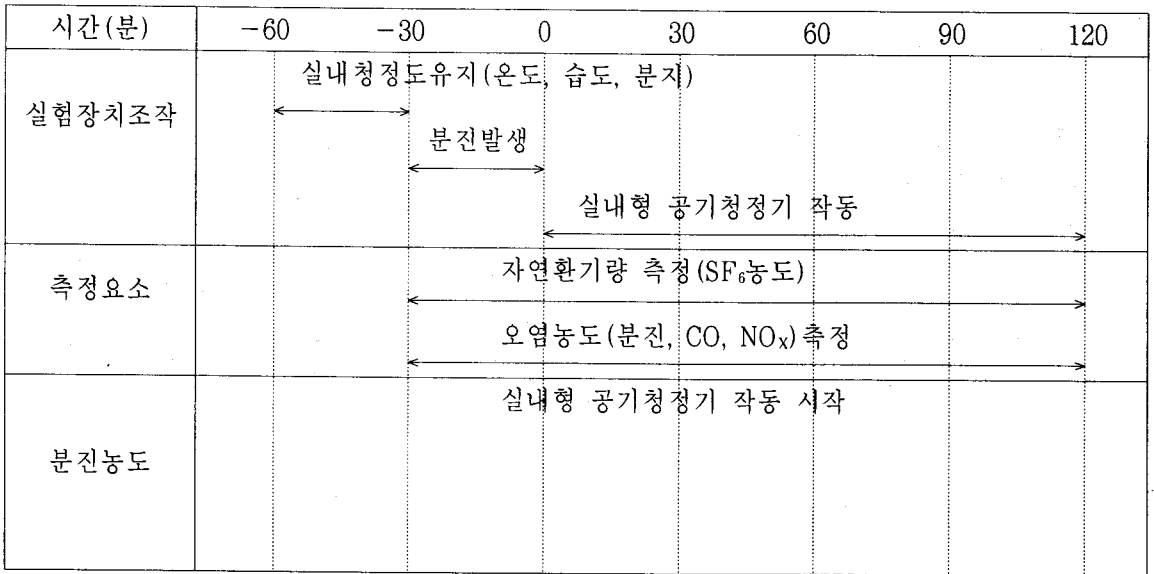


그림 4 실험 스케줄 및 실험방법

다. 본 실험에서 분진을 발생하기 위하여 담배와 향을 연소시키고, 불완전 연소에 의하여 많이 발생되는 NO_x 및 CO 가스의 농도를 측정 조사하였다. 1차 측정에서 인공기후실 내부에서 10분동안에 담배 9개피를 연소시켰으며, 2차 측정에서 9개의 향을 30분동안 연소한 후 공기청정기를 통하여 제거하였다.

그림 5는 인공기후실의 중앙점에서 측정된 시각별 NO_x 및 CO 가스농도를 나타낸 것이

다. 흡연시 CO 농도는 최대 15.64ppm으로 나타났으며, 담배 1개피의 흡연에 의하여 실험실 내부의 CO 농도에 1.7ppm 정도의 영향을 미친 것으로 측정되었다. 또한, NO_x 농도는 최대 158.5ppb로 나타났으며, 담배 1개피의 흡연에 의하여 17.5ppb 정도의 영향을 미친 것으로 측정되었다.

향을 연소할 때에 실험실 내부의 CO 농도는 최대 19.62ppm으로 나타나 1개의 향 연

소에 의해 실험실 내부의 CO 농도에는 2ppm 정도의 영향을 미친 것으로 측정되었으며, NO_x 농도는 최대 121ppb로 측정되었다.

그림 6은 시각별 부유분진의 농도 변화를 나타낸 것이다. 분진은 담배나 향의 연소에 의하여 농도가 증가되다가 공기청정기를 작동시킴에 따라 농도가 급격히 감소되는 것을 알 수 있다. 또한, 담배 1개피의 흡연에 의하여 0.27mg/m³ 정도의 부유분진이 발생되었으며, 향 1개의 연소에 의해서는 0.25mg/m³ 정도의 부유분진이 발생된 것으로 측정되었다.

(2) 틈새바람에 의한 환기량

틈새바람에 의한 환기량을 측정하기 위하여 SF₆ 가스를 트레이서 가스로 사용한 농도 감쇠법을 이용하였다. 그림 7은 인공기후실 중앙점에서 측정된 SF₆ 가스농도의 변화를 나타낸 것이다. 표 4는 지점별 환기량을 구한 것으로 지점별 차이는 그리 크지 않으며, 측정기간 동안의 평균 자연환기량은 7.68m³/hr으로 나타났다.

4.2 공기청정기의 제진 효율

본 실험은 인공기후실 내부의 공조설비나 환기설비를 작동하지 않은 상태에서 측정용 분진을 발생시킨 후에 실내형 공기청정기만을 작동시킨 상태에서 분진의 농도변화를 측정하여 공기청정기의 제진효율을 평가하였다.

공기청정기의 분진 제거능력은 주로 장치의 송풍능력과 필터의 제거성능에 의해서 결정되며, 이 때 인공기후실의 틈새바람에 의한 환기량도 실내의 부유분진 농도에 영향을 미치게 된다.

따라서 제진 효율(D_d)은 공기청정기를 작동시키지 않은 상태에서 부유분진의 감쇠비율에 대한 공기청정기 작동시 감쇠비율을 산출하여 간단하게 구할 수 있다. 즉, 다음의 식(5)와 같이 분진이 발생된 후 정상상태에 도달 했을 때의 농도에 대한 시각별 농도비를 무차원화 시킨 후에 농도비가 0.1이 되기 까지 걸린 시간을 이용하기로 한다.

$$D_d[\%] = \left(1 - \frac{t_{ac}}{t_n}\right) \times 100 \tag{5}$$

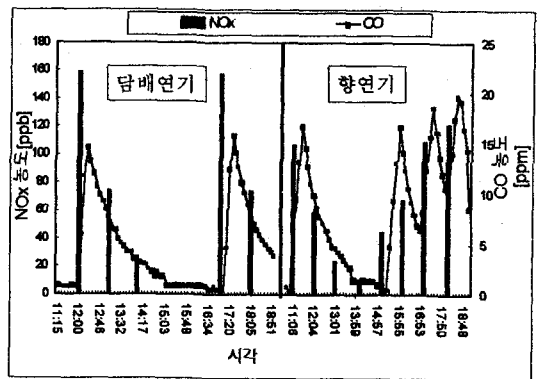
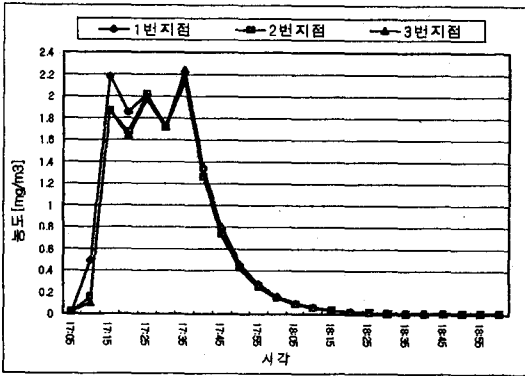


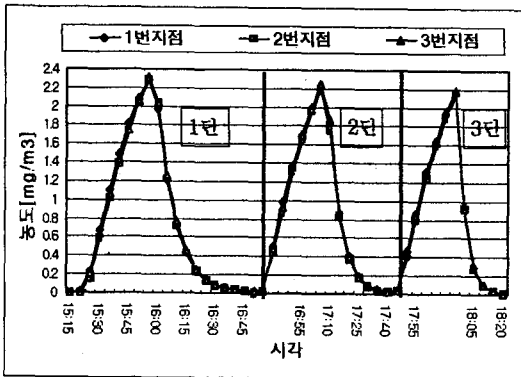
그림 5 중앙점의 NO_x 및 CO 가스 농도

표 4. 각 지점별 환기량

| 지점 | 환기량 [m ³ /hr] | 환기회수 [회/hr] |
|-------|-----------------------------|----------------|
| 1번 지점 | 7.76 | 0.28 |
| 2번 지점 | 7.53 | 0.27 |
| 3번 지점 | 7.64 | 0.27 |
| 4번 지점 | 7.86 | 0.28 |
| 5번 지점 | 7.61 | 0.27 |
| 평균치 | 7.68 | 0.28 |



a) 담배흡연시 각 지점별 부유분진 농도



b) 향 연소시 각 지점별 부유분진 농도

그림 6 각 지점별 부유분진 농도

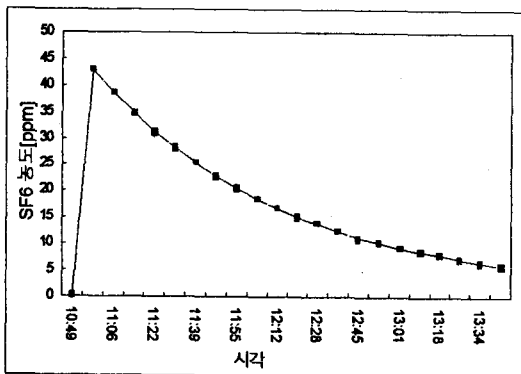


그림 7 SF₆ 가스농도

식(5)에서 t_n 은 공기청정기를 작동시키 않은 상태에서 경과된 시간이고, t_{ac} 는 공기청정기를 작동시켰을 때 경과된 시간을 나타낸다. 그림 8은 측정점②에서의 부유분진 농도비를 나타낸 것으로 C_0 는 분진이 발생된 후 정상상태에 도달 했을 때의 농도이고 C 는 공기청정기 작동에 따른 시각별 부유분진 농도이다.

표 5는 식(5)에 의해서 계산된 결과로서, 송풍량이 증가할수록 제진효율도 높게 나타났다.

5. 맺음말

본 연구에서는 공기청정기의 부유분진에 대한 제거성능을 평가하기 위하여 인공기후실 내부에서 분진 농도의 감쇠특성을 측정하였다. 담배연기와 향 연기를 발생하여 평가용 분진으로 이용하였으며, 이들의 연소에 의하여 방출되는 가스상 오염 물질 중에서 CO 가스와 NO_x의 농도를 측정하고, 인공기후실의 틈새바람에 의한 자연환기량을 측정하여 분진 농도의 변화로부터 평가대상 공기청정기의 제진효율을 도출하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연소에 의해서 발생된 분진은 실내형 공기청정기의 작동에 의해서 일정한 비율로 감쇠되었으며, 송풍량이 증가함에 따라서, 감쇠율도 증가하는 것으로 나타났다. 주로 불완전연소에 의해서 발생하는 CO 가스 및 NO_x는 인공기후실의 틈새바람에 의한 환기량에 의해서 감쇠되고 있으며, SF₆의 농도변화와 대체로 일치하는 것으로 나타났다.

(2) 담배의 흡연과 향의 연소에 의하여 다

량의 CO 가스와 NO_x가 방출하는 것으로 확인 되었으며, 흡연에 의하여 발생하는 분진량은 1개피당 0.27mg/m³, 향 1개의 연소에 의하여 0.25mg/m³으로 나타났다.

(3) 본 연구에서 평가된 공기청정기의 제

진효율은 담배 흡연시에 79.7% 정도를 나타냈으며, 향 연소시에는 송풍량이 증가함에 따라 각각 80.2%, 86.2%, 89.5%로 증가하는 것으로 측정되어, 비교적 분진에 대한 제거 효율이 우수한 것으로 판단되었다.

표 5. 제진 효율(D_d)

| 측정조건 | | 측정점 | | | 평 균 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 측정점① | 측정점② | 측정점③ | |
| 자연상태 | 시간[분] | 110 | 105 | 107.5 | 107.5 |
| | 효율[%] | 80 | 79.52 | 79.53 | 79.69 |
| 흡연시 | 시간[분] | 22 | 21.5 | 22 | 21.83 |
| | 효율[%] | 80 | 79.52 | 79.53 | 79.69 |
| 향연기 송풍 1단 | 시간[분] | 22 | 21 | 21 | 21.33 |
| | 효율[%] | 80 | 80 | 80.47 | 80.16 |
| 향연기 송풍 2단 | 시간[분] | 15 | 15 | 14.5 | 14.83 |
| | 효율[%] | 86.37 | 85.71 | 86.51 | 86.20 |
| 향연기 송풍 3단 | 시간[분] | 11 | 11.5 | 11 | 11.17 |
| | 효율[%] | 89.55 | 89.04 | 89.77 | 89.45 |

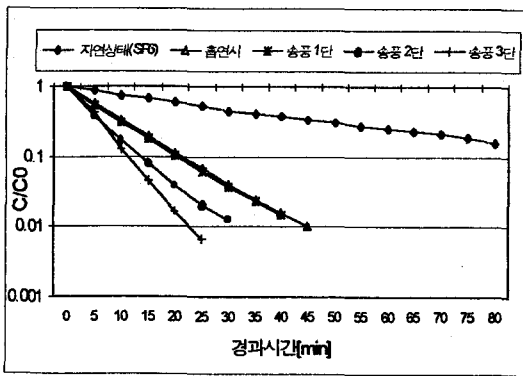


그림 8 측정점②에서의 부유분진농도비

참 고 문 헌

1. ASHRAE Standards 62-1989 "Ventilation for acceptable indoor air quality", ASHRAE, 1989

2. MIZUNO Noriyasu et al. : Studies on an Efficiency Assesment of Air Cleaners (Part 1), Architectural Institute of Japan, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, pp. 641-642, 1991.

3. Richard J. Saughnessy, Estelle Levetin and Kerry Sublette : Effectiveness of Portable Indoor Air Cleaners in Particulate and Gaseous Contaminant Removal, Proceedings of Indoor Air '93, Vol. 6, pp. 381-386, 1993.

4. SHINADA Yoshiteru et al. Study on Using Small Air Cleaners to Improve Indoor Air Quality in Small Spaces, Proceedings of Indoor Air '96 Vol. 3, pp. 489-494, 1996.