

## 실공간에서 공기정화시스템을 이용한 실내 오염 입자 제거 특성에 관한 연구

구정환\* · 김성찬\* · 김장우\* · 이주용\* · 이재근\*\* · 강태욱\*\*\* · 이감규\*\*\*

### A Study on the Removal Characteristics of Indoor Air Pollutants using the Air Cleaning System

Jeong Hwan Koo, Seong Chan Kim, Jang Woo Kim, Ju Yong Lee,  
Jae Keun Lee, Tae Wook Kang, and Kam Gyu Lee

**Key Words :** 공기정화시스템, 실내 오염물, 담배입자, 실내 공기질, 정전 필터

#### Abstract

The purpose of this study is to determine the performance of a commercial air cleaner in removing tobacco smoke indoors. Following injection of tobacco smoke in a room, decay rates for particle concentrations were obtained for mass concentration at each point. The size distribution of the tobacco smoke particles was approximately 1.266  $\mu\text{m}$  in mass median diameter with a geometric standard deviation of 1.313. The air cleaner consisted of an electrostatic filtration unit and a fan operated at a flow rate of 5.98 CMM. The collection efficiency for  $>1 \mu\text{m}$  was more than 99%. Without air cleaner operation, tobacco smoke concentration ratio in room decreased to 30% of initial values within 30 minutes and with air cleaner operation, decreased to 90% of initial values in the test chamber, volume 51.27  $\text{m}^3$ . Without air cleaner operation, tobacco smoke concentration ratio in room decreased to 10% of initial values within 30 minutes and with air cleaner operation, decreased to 30-70% of initial values in the test chamber, volume 149.2  $\text{m}^3$ .

#### 기호설명

Q : 유량, CMM ( $\text{m}^3/\text{min}$ )  
 $C_t$  : 시간에 따른 질량 농도 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )  
 $C_0$  : 초기 질량 농도 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )  
 V : 실공간 체적,  $\text{m}^3$   
 ACH : 환기횟수  $\text{h}^{-1}$

#### 1. 서론

현대인들은 90% 이상의 시간을 주택, 사무실, 지하공간 등의 실내공간에서 지내고 있다. 따라서 인간의 생활, 휴식<sup>1)</sup>, 그 외의 행동을 무리 없이 행하기 위한 필요조건으로서 쾌적한 실내환경이 요구되며 이것을 실현시켜주는 것이 냉난방·공조설비이다. 일반적으로 실내환경은 온도, 습도, 기류, 복사온도 등의 온열환경과 탄산가스, 일산화탄소, 분진, 냄새, 질소 산화물, 공기중 미생물 등의 오염물질에 관련한 공기질(청정)환경으로 크게 구분할 수 있다. 종래에는 실내 공간을 단지 작업공간이라는 관점 하에서 주로 온·

\* 부산대학교 기계공학과 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부

\*\*\* (주) LG 전자

습도 등 규정된 일정치를 유지하는 데에만 관심을 기울이고, 확실적인 상태의 형성에 주안점을 두고 단순하게 온도, 습도와 같은 온열환경의 조절만 수행하던 에어컨을 위주로 시장이 형성되었으나, 최근 건물의 기밀화와 실외공기질의 악화 등의 원인으로 실내에서 발생하는 오염물을 공기 정화 장치를 통해 제어하는 것에 관심이 집중되고 있다. 많은 연구자들이 상용화된 공기 정화 장치의 성능 평가에 관한 연구를 수행하여 왔는데, Offermann et al. (1985)은 11종류의 상용화된 공기 정화 장치를 이용하여 담배 연기 제거 성능 평가를 수행하였고, Cheng (1998)은 오염입자로 꽃가루와 균질물을 사용하여 실제로 상용화된 공기정화 시스템은 실내의 오염된 공기를 흡입구로 흡입하여 정화 필터를 통해 오염물을 여과시킨 다음 실내로 뿜출하는 방식이 주류이다.

본 연구는 쾌적한 실내 공기질을 유지하기 위하여 요구되어지는 공기 정화 장치의 성능을 분석하는 연구로서 대표적인 실내 오염입자인 담배 입자를 이용하여 체적이 다른 두 종류의 실공간에서 오염입자 제거 특성을 파악하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구는 공기 정화 장치의 성능을 평가하기 위하여 Onepass 실험을 통한 입경별 오염입자 제거 실험과 실공간에서 입경별, 질량별 오염 입자 제거 실험을 수행하였다.

### 2.1 Onepass 식 입경별 입자 제거 성능

Onepass 실험 장치는 공기 정화 장치에 직경 100 mm의 원형 덕트와 유입구 및 토출구의 크기에 맞는 사각 덕트를 설계, 제작하여 설치하였다 또한 각각의 덕트는 공기 정화 장치의 유입구와 토출구에서 압력손실이 최소화되도록 설계되었고, 상류 측의 담배 입자 공급부에는 스크린을 부착하여 원형 덕트 내에 담배 입자의 균일한 공급을 유도하였다. 덕트 내의 입자 샘플링 위치는 입자가 충분히 혼합되어 대표값을 가지는 위치를 선정하였다. 집진 성능 평가용 시험분진은 담배입자를 이용하였으며, 공기 정화 장치가 작동되는 상태에서 토출구에 연결된 덕트의 입구

부에서 담배입자를 발생시키고, 광산란 입자 카운터 (FE-80, HIAC/ROCYO 사)를 이용하여 공기 정화 장치의 상류측과 하류측의 담배입자 농도를 측정하여 입경별로 공기 정화 장치에 의하여 제거된 입자의 개수를 측정하였다. 또한 공기 정화 장치의 입자 집진 장치의 인가전압에 따른 집진성능을 측정하기 위하여, 대전부 (5.29 kV) 및 집진부 (2.64 kV)의 고전압을 인가하였을 경우, 인가하지 않았을 경우, 집진 장치 자체를 제거한 경우에 있어 유량 (Q) 4.18 CMM, 5.12 CMM, 5.98 CMM에서 입경별 입자 제거 성능 실험을 수행하였다.

### 2.2 실공간에서 입자 제거 성능

실공간에서 입경별, 질량별 오염 입자 제거 실험은 Fig. 1에 표시된 바와 같이 체적이 각각  $V_1=51.27 \text{ m}^3$  (5,800×3,400×2,600 mm),  $V_2=149.2 \text{ m}^3$  (8,200×7,000×2,600 mm)인 실공간에서 vacuum pump와 vacuum transducer를 조합하여 담배 입자 발생 장치를 구성하였다. 담배 입자를 발생 시킨 후 실공간 내에 담배 입자의 균일한 혼합을 위해 mixing fan을 설치, 1분 정도 mixing fan을 가동시킨다. 담배 입자의 실공간 내 균일 혼합이 형성되고 나면, 한쪽 벽면의 중앙에 설치되어 있는 공기 정화 장치를 가동시키는데, 이 때 유량은 5.98 CMM이다. 평면에 대하여 실중앙을 중심으로 가로, 세로 각각 3등분하여 9개의 측정위치를 선정하였고, 인간의 활동시 호흡기관 (코, 입)이 위치하는 지면에서 1.3 m 높이에서 광산란 입자 카운터 (FE-80, HIAC/ROCYO 사)를 이용하여 질량별 오염 입자 농도를 측정하였다. 입경별 오염 입자 농도 실험은 HIAC/ROCYO 사의 FE-80 (Model 1230)을 사용하여 대표적으로 실중앙에서 실험을 수행하였다. 또한 실공간에서 오염 입자 농도와 기류 속도와의 관계를 파악하기 위하여 Casella 사의 ICS-500을 사용하여 공기 정화 장치를 작동시켰을 경우의 각 측정위치별 기류 속도를 측정하였다.

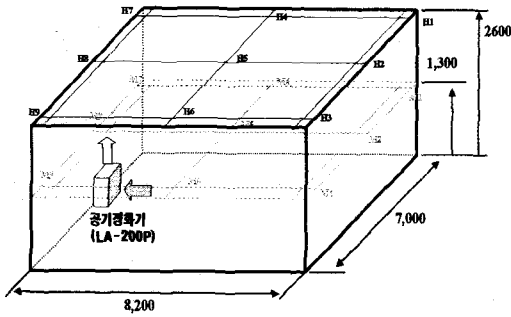


Fig. 1 Schematic diagram of test room and test point (unit : mm)

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Onepass 식 입경별 입자 제거 성능

본 연구에서는 시험 입자로 주요 실내 오염원 중의 하나인 담배입자를 이용하였으며, Fig. 2는 담배입자의 입경 분포를 측정된 것으로 질량 평균경 (MMD)가 1.266  $\mu\text{m}$ 로 대부분의 입자가 1.0  $\mu\text{m}$  이하의 입자임을 알 수 있다. 공기 정화 장치는 전기집진의 원리를 이용한 것으로 방전부 (Ionizer)의 방전 와이어에 고전압 (5.29 kV)을 인가하여 코로나 방전으로 입자를 대전시키고, 집진부에서는 전기장을 형성하여 정전기력을 이용하여 입자를 포집하는 원리이다. 본 실험에서는 방전부와 집진부 각각에 전압을 인가한 경우와 인가하지 않은 경우, 전기 집진 장치를 본체에서 분리한 경우에 대하여 입자 제거 효율을 측정하였다. Fig. 3은 공기 정화 장치에 의한 입자 제거 효율을 나타낸 것으로, 2.5  $\mu\text{m}$  이상의 입자에 대해서는 모든 경우에 있어 높은 제거 효율을 나타내고 있으며, 그 이하의 입자에 대해서는 제거 효율이 낮아짐을 알 수 있다. 특히 전기력을 가한 경우, 5  $\mu\text{m}$  이상의 입자는 100% 제거가 가능하며, 유량이 4.16 CMM인 경우 1  $\mu\text{m}$  이상의 입자에 대해 90% 이상의 제거 효율을 나타내었다. 전기를 인가한 경우 저유량에서 입자 제거 효율이 높는데, 이는 저유량에서는 입자가 집진부를 낮은 속도로 통과하기 때문에 정전기력에 의해 제거될 가능성이 높기 때문이다. 반면에 정전기력을 가하지 않은 경우는 입자가 대부분 팬에 의한 관성이나 확산력에 의해 제거가 되므

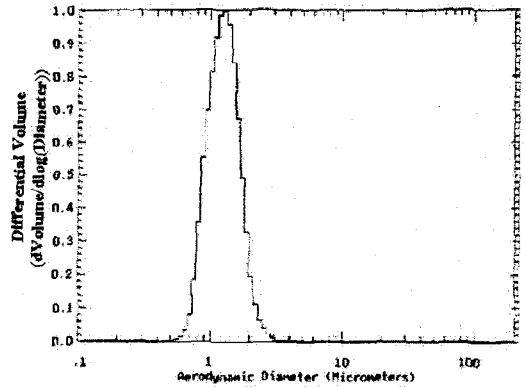


Fig. 2 Size distribution of Tobacco Smoke Particle

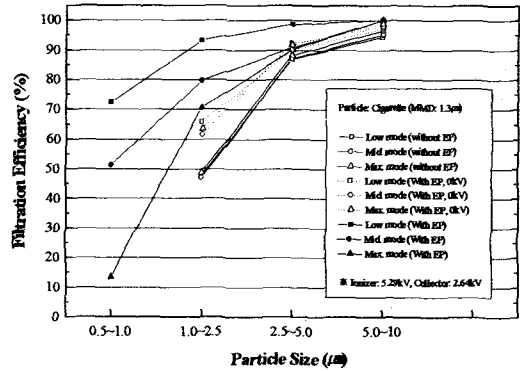


Fig. 3 Collection efficiency as a function of particle size

로 저유량보다는 고유량에서 제거 효율이 높은 경향을 나타낸다.

#### 3.2 실공간 입자 제거 성능

공기 정화 장치의 실내 오염입자 제거 성능을 분석하기 위하여 체적이 다른 두 종류의 실공간에서 오염 입자 제거 성능을 분석하였다.

Fig. 4는 체적이  $V_1=51.27 \text{ m}^3$  (5,800×3,400×2,600 mm)인 실공간에서 환기횟수가  $7.0 \text{ h}^{-1}$  ( $Q=5.98 \text{ CMM}$ )인 조건에서 측정위치별 오염 입자 제거 성능 결과와 자연감소 결과를 보여준다. 자연 감소란 실내에서 공기 정화 장치를 가동하지 않은 경우 담배 연기를 공급하여 입자의 확산

에 의한 벽면 부착과 중력 침강에 의한 입자의 감소를 의미한다. 본 실험에서 나타난 자연 감소의 경우는 실공간이 완전 밀폐되어 있지 않기 때문에 위에서 언급한 입자의 확산에 의한 벽면 부착, 중력 침강 이외에 틈새에 의한 환기의 메카니즘도 포함된 결과를 나타낸다. 담배 입자의 농도 ( $C_0$ )는  $449 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 자연 감소의 경우 30분이 경과하여도 초기 농도의 30% 이하의 농도 감소를 나타내고, 공기 정화 장치를 가동하였을 경우는 30분 경과 시 초기 농도의 90%가 제거됨을 알 수 있다. 일반적으로 학교 건물에서는 시간당 6회의 환기횟수를 필요로 하며, 사무실과 같은 실내 공간에서는 시간당 6회에서 10회 정도가 적당하다고 할 때, 체적이  $51.27 \text{ m}^3$ 인 공간에서 전 공간에 대해 효율적으로 오염 입자를 제거할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 실내에서 자연 감소와 공기 정화 장치를 가동하였을 때의 입경별 담배 입자 제거 성능을 측정된 결과이다. 결과에 알 수 있듯이 입자 제거는 미세입자보다 조대입자의 제거성능이 큰 차이를 보이고, 또한 전체 입자의 질량 농도 감소에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

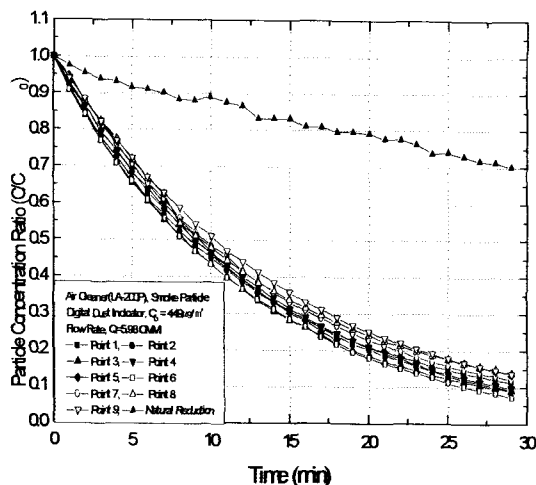


Fig. 4 Variation of particle concentration with each test point ( $\text{ACH}=7.0 \text{ h}^{-1}$ )

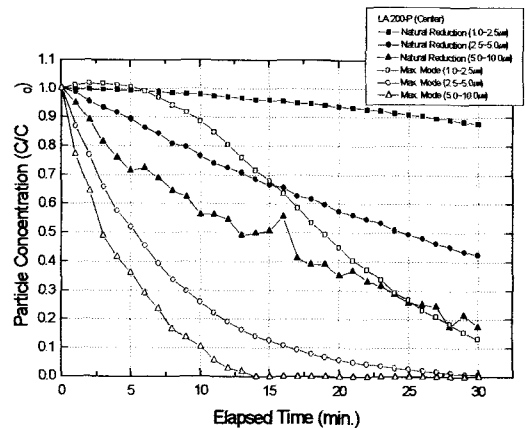


Fig. 5 Variation of particle concentration with particle size ( $\text{ACH}=7.0 \text{ h}^{-1}$ )

Fig. 6은 체적이  $149.2 \text{ m}^3$  ( $8,200 \times 7,000 \times 2,600 \text{ mm}$ )인 실공간에서 환기횟수가  $2.4 \text{ h}^{-1}$  ( $Q=5.98 \text{ CMM}$ )인 조건에서 측정위치별 오염 입자 제거 성능 결과와 자연감소 결과를 보여준다. 자연감소의 경우 초기 농도에 대해 30분 경과 시 10% 감소되는 결과를 보이는데, 앞선 결과에 비해 20%정도 감소 성능이 감소함을 나타내고 있다. 이는 실공간에 따라 틈새에 의한 환기 메카니즘에 의한 입자 제거 성능에 차이를 보이기 때문으로 판단된다. 또한 측정 위치별 오염 입자 제거 성능은 위치에 따라 입자 제거 성능이 30분 경과 시 초기 농도의 30-70%로 감소됨을 알 수 있는데, 측정 위치 중 제거 성능이 낮은 지점이 실공간에서 Dead Zone임을 알 수 있다. 실험 결과 Point 3과 5에서 제거 성능이 낮은 결과를 보이고 있다. 이는 앞서 살펴 본 바와 같이 학교나 사무실의 경우 환기횟수가  $6-10 \text{ h}^{-1}$  정도가 되어야 하나 본 조건 (유량,  $Q=5.98 \text{ CMM}$ , 체적  $V_2=149.2 \text{ m}^3$ )에서의 환기횟수는  $2.4 \text{ h}^{-1}$ 로 적용된 실공간에서 오염 입자를 제거하기에는 부족한 환기횟수임을 알 수 있다. 또한 측정 위치별로 오염 입자 제거 성능이 차이가 나는 것은 공기 정화 장치의 토출 유량이 원심팬의 영향으로 좌측으로 치우쳐 있기 때문에 측정위치별로 오염 입자 제거 성능이 차이가 나는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 실공간의 중앙부 (Point 5)에서 입경별 제거 성능을 측정한 결과이다. 입경 범위는  $0.5-1.0, 1.0-2.5, 2.5-5.0, 5.0-10.0 \mu\text{m}$ 로 분류하여

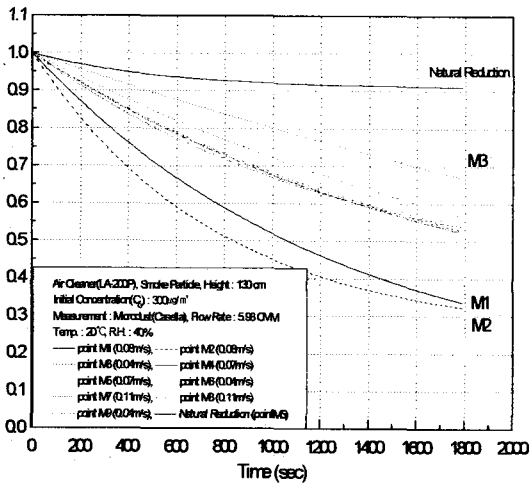


Fig. 6 Variation of particle concentration with each test point (ACH=2.4 h<sup>-1</sup>)

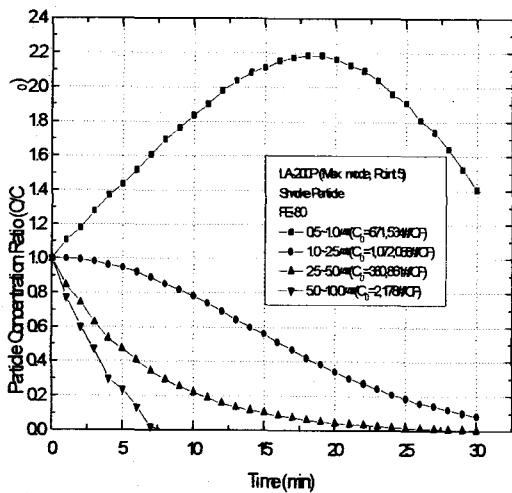


Fig. 7 Variation of particle concentration with particle size (ACH=2.4 h<sup>-1</sup>)

측정하였으며, 결과에서 보듯이 5.0-10.0 μm의 조대 입자는 10분 이내에 100% 제거가 되지만 나머지의 미세 입자들의 제거 성능은 입자의 크기에 따라 입자 제거 효율이 변함을 알 수 있다. 특히 0.5-1.0 μm의 미세 입자는 초기에 증가하는 경향이 나타나는데, 이는 담배 입자가 300 μg/m<sup>3</sup> 정도의 저농도에서는 입자가 발생한 후 개개 입자의 표면 증발 현상으로 인해 입자의 크기가 작아지기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 담배 입자를 이용한 공기 정화 장치의 오염 입자 제거 성능을 평가하였다. 현재 상용화 된 공기 정화 장치는 담배 입자를 제거하는데 효율적임을 확인할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 공기 정화 장치에서 1 μm 이상의 입자들은 99% 이상의 효율로 제거된다.
- (2) 환기 횟수가 7.0 h<sup>-1</sup> (실공간체적, V<sub>1</sub>=51.27 m<sup>3</sup>)인 실공간에서 자연 감소의 경우 30분 경과 시 담배 입자는 초기농도의 30% 정도 제거되었고, 공기 정화 장치를 가동하였을 때, 전 측정 위치에서 초기 농도의 90%까지 감소됨을 확인할 수 있었다.
- (3) 환기 횟수가 2.4 h<sup>-1</sup> (실공간체적, V<sub>1</sub>=149.2 m<sup>3</sup>)인 실공간에서 자연 감소의 경우 30분 경과 시 담배 입자는 초기농도의 10% 정도 제거되었고, 공기 정화 장치를 가동하였을 때, 전 측정 위치에서 초기 농도의 30%-70%까지 감소됨을 확인할 수 있었다.

#### 후기

본 연구를 (주)LG전자의 지원 하에 수행되었으며 계속해서 많은 도움을 주셨던 관계자 여러분께 여러분들께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Bearg, D.W., (1993), "Indoor air quality and HVAC systems", Lewis Publishers
- (2) Godish, T., (1990), "Indoor Air Pollution Control", Lewis Publishers
- (3) Lee, Jae-Keun, Seong-Chan Kim, and B.Y.H. Liu (1996), "Performance Evaluation of Gas Cleaning Industrial Filters using a Bi-Modal Test Aerosol for Dust Loading Studies", Energy Engg. J, Vol. 5, No. 2, pp. 131-137.
- (5) Liu, B.Y.H., J.K. Lee, H. Mullins, and S.G. Danish, (1993), "Respirator Leak Detection by Ultrafine Aerosols: A Predictive Model

- and Experimental Study", Aerosol Science and Technology, Vol.19, No.3, pp. 15-26.
- (7) Sandberg, M. (1996), "Building Ventilation: Theory and Measurement", John Wiley & Sons
- (8) Yung Sung Cheng, (1998), "Efficiency of a Portable Indoor Air Cleaner in Removing Pollens and Fungal Spores", Aerosol Science and Technology, Vol. 29, No. 92
- (17) 이정주 (1993), "실내환기효율의 공간적 변화특성에 관한 연구", 한국대기보전학회지, Vol.9, No.3
- (18) 이정주 (1994), "전체환기 모형실을 이용한 실내공기질 평가에 관한 연구", 박사학위논문, 서울시립대학교
- (20) 조민철, (1999), "추적가스를 이용한 환기방식별 실내환기효율 평가에 관한 연구", 공기조화 냉동공학회 동계학술발표회 논문집 (I), pp. 328-332.
- (21) 조민철, (2000), "전체환기 모형실을 이용한 1/2/3종 환기방식별 환기특성에 관한 연구", 석사학위논문, 부산대학교
- (23) 한국기계연구원, (1996), "공기정화기 성능 시험 및 평가 연구"
- (27) 홍영기 (2000), "펄스방전 플라즈마와 산화티타늄 광촉매에 의한 공기정화 특성 개선에 관한 연구", 박사학위논문, 부산대학교
- (28) 윤석구, 구정환, 김성찬, 구재현, 이재근, 조민철, 강태욱, 이감규 (2000), "모형 실과 실공간에서 급기유량에 따른 환기성능의 실험적 연구", The 2st Korean Conference on Aerosol and Particle Technology, 용평리조트, 7월 6일-8일, pp.127-128.
- (29) Koo, Jeong-Hwan, Seong-Chan Kim, Doo-Hyun Kim, Jae-Kun Lee, Tae-Wook Kang and Kam-Gyu Lee (2000), "A Study on the Removal Characteristics of Indoor Air using the Pollutants Air Cleaning System", The 2st Korean Conference on Aerosol and Particle Technology, 용평리조트, 7월 6일-8일, pp.145-146.