

## 복합식 공기청정기의 물리적 및 생물학적 입자상 물질의 제거 효과

김기연 · 김치년\* · 김윤신 · 노영만<sup>†</sup> · 이철민

한양대학교 환경 및 산업의학연구소, \*연세대학교 산업보건연구소

### Efficiency of the Hybrid-type Air Purifier on Reducing Physical and Biological Aerosol

Ki-Youn Kim · Chi-Nyon Kim\* · Yoon-Shin Kim · Young-Man Roh<sup>†</sup> · Cheol-Min Lee

*Institute of Environmental and Industrial Medicine (IEM), Hanyang University*

*\*Institute for Occupational Health, College of Medicine, Yonsei University*

(Received August 1, 2006/Accepted October 19, 2006)

#### ABSTRACT

There was no significant difference in the CADR (Clean Air Delivery Rate) between physical aerosols, NaCl and smoke, and biological aerosols, airborne MS2 virus and *P. fluorescens*, which implicate that the hybrid-type of air purifier, applying the unipolar ion emission and the radiant catalytic ionization, imposed identical reduction effect on both physical aerosol and bioaerosol. Ventilation decreases the efficiency of air cleaning by unipolar ionization because high ventilation diminishes the particle concentration reduction effect. The particle removal efficiency decreases with increase in the chamber volume because of the augmented ion diffusion and higher ion wall loss rate. Particle size affects the efficiency of air ionization. The efficiency is high for particles with very small diameter because reduction of charge increases with particle size. If there is no increasing supply of ions, the efficiency of air cleaning by unipolar ionization increases with respect to initial concentration of particles because of the large space charge effect at high particle concentration and amplified electric field.

**Keywords:** air purifier, physical aerosol, bioaerosol, removal efficiency, CADR

#### I. 서 론

실내에서 장시간 호흡성 분진과 병원성 부유 미생물 등의 유해인자에 노출되게 되면 다양한 건강상의 문제를 초래할 수 있다.<sup>1)</sup> 이러한 실내 환경으로부터 발생하는 입자상 오염물질의 노출을 줄이기 위해 지금까지 여러 기술들이 제안되어 발전되어 왔다.<sup>2)</sup> 환기가 잘 되지 않고 필터에 의한 실내외 공기 전환이 원활히 이루어지지 않는 한정된 공간에서의 입자상 오염물질의 제어는 쉽지 않게 되며, 특히 생물학적 입자상 오염물질의 경우는 더욱 그러할 수 있다. 대부분의 실내 공기청정 기술관련 장비들이 주로 가스상 오염물질 및 비생물학적 입자상 오염물질의 농도를 저감하는 데 목적을 두

고 있는 반면,<sup>3)</sup> 몇몇 다른 종류의 장비들은 공기 중 바이러스, 박테리아, 곰팡이 등의 생물학적 입자상 오염물질, 즉 바이오에어로졸의 사멸에 관심을 두는 것들도 있다.<sup>4)</sup>

현재 우리나라에서 시판되고 있는 공기청정기는 필터를 이용한 집진 방식, 물을 이용한 습식 방식, 그리고 이 두 방식의 기능을 극대화하기 위한 목적으로 전기 집진 방식, 음이온 방식, UV 조사를 통한 광촉매 방식 등을 추가한 복합 방식으로 구분할 수 있다.<sup>5)</sup> 하지만 각 공기청정기의 효율성에 대한 객관적인 검증 절차가 확고히 마련되어 있지 않아 구매하고자 하는 소비자들이 선택에 많은 혼란스러움을 겪고 있다. 공기청정기의 효율성 평가와 관련하여 2006년 5월 환경부에서 발표한 자료에 의하면 필터식과 복합식 제품은 공기질 개선효과가 있으며, 오존 발생량도 기준치 이내였으나, 음이온식 제품은 집진, 탈취 능력이 미흡하고 오존도 기준치를 초과 발생하기 때문에 소비자 피해가 우려된다고 보고하였다.<sup>6)</sup>

<sup>†</sup>Corresponding author : Institute of Industrial and Environmental Medicine, Hanyang University 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul, Korea  
Tel: 82-2-2290-8278, Fax: 82-2-2299-3915  
E-mail : ymroh@hanyang.ac.kr

이번 환경부에서 건강 보건학적인 측면에 대해 부정적 평가를 내린 음이온 방식 공기청정기의 경우 여타 다른 종류의 공기청정기와는 달리 부산물로 오존을 발생시킨다는 큰 문제점을 가지고 있는 것이 사실이다. 오존에 장기간 노출되면 호흡기계에 심각한 장애를 초래하기 때문에 우리나라를 포함한 여러 선진국들이 실내 오존 농도 노출 기준을 0.05 ppm으로 설정하여 규제하고 있다. 하지만 공기청정기로부터 발생하는 오존의 순기능으로 공기 중 병원성 미생물을 사멸하는 데 탁월한 효과를 보이는 것으로 외국의 몇몇 연구자들에 의해 보고되고 있기도 하다.<sup>7,9)</sup> 또한 이번 환경부에서 발표한 자료는 주로 포름알데히드나 아세트알데히드 등과 같은 휘발성 유기화합물 측면에서 각 공기청정기를 평가하였기 때문에 공기질 개선효과가 높다고 한 필터식과 복합식 제품의 생물학상 오염물질의 제거 효율성에 대한 명확한 판단은 현재로서는 유보적일 수 밖에 없다.

건강상에 문제를 유발하지 않는 수준의 실내 오존 농도를 유지하면서 음이온 및 광촉매 방식의 공기청정기를 가동하면 오존을 발생시키지 않은 다른 종류의 공기청정기보다 생물학상 오염물질의 제거 효율성은 상대적으로 높을 것이라 예측되나, 아직까지 이를 뒷받침할 객관적인 평가 자료가 다른 실내공기 오염물질에 비해 극히 미진한 실정이다. 부유 곰팡이, 박테리아, 바이러스 등의 노출에 의해 면역성이 상대적으로 약한 사람 및 소아들 사이에서 천식 등의 알레르기성 질환의 발병 사례가 급속히 증가되는 현 시점<sup>10)</sup>에서 이들에 대한 평가 자료는 절실히 요구되는 바이기도 하다.

따라서 본 연구는 음이온 방식과 UV 조사를 통한 광촉매 산화 공법이 혼합된 공기청정기를 대상으로 생물학적 입자상 물질의 제거 효율을 평가하는데 목적을 두었다. 연구 내용은 물리적 특성의 비생물학적 입자상 물질의 제거 효율을 동시에 평가한 자료를 서로 객관적으로 비교하여 본 공기청정기를 실제 주거 공간에서 효율적으로 적용하기 위한 방안들을 제시하는 데 있다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 실험 설계

입경별 입자상 오염물질의 농도를 Wide-Range Particle Spectrometer(WPS; MSP Corp., MN, USA)를 통해 실험이 수행된 밀폐형 챔버(24.3 m<sup>3</sup>; L×W×H = 3.78 m×2.44 m×2.64 m) 바닥으로부터 1.5 m 떨어진 상부 중앙 지점에서 1분 간격으로 2시간 동안 연속 측정하였으며, 동시에 동일한 지점에서 오존 농도 또한 Ozone Monitor(Model LC-400, PCI Ozone & Control

Systems Inc., NJ, USA)를 통해 측정하였다. 본 측정 장비는 0.01 μm에서 10 μm까지 폭넓은 범위의 입자상 물질 농도를 입경별로 측정이 가능하나, 본 연구에서는 공기 중 바이러스와 박테리아의 입경 크기 범위에 해당되는 0.02-2.0 μm에 초점을 맞추었다. 본 연구에서 평가된 공기청정기의 유형은 음이온 발생과 광촉매 산화 방식을 접목한 형태의 공기청정기(L×W×H = 20 cm×16.5 cm×8.5 cm)로 현재 H사에서 제작되어 시중에 판매되고 있다. 모든 실험은 3회 반복 수행되었으며, 평균값을 각 실험의 대표값으로 산정하였다.

### 2. 측정 대상 물질

측정 대상 입자상 물질로 물리적 측면에서는 smoke와 NaCl을, 생물학적 측면에서는 *Pseudomonas fluorescens* 균주와 MS2 박테리오파지 바이러스를 선정하였다. Smoke의 경우 실험 전 챔버 안에서 종이류를 태우는 방법으로 초기 농도를 조성하였다. NaCl, *P. fluorescens*, MS2는 400 ml 정도로 제조된 stock solution (20%)을 Collision nebulizer(BGI Inc., MA, USA)에 투입한 후 6 l/min 유량으로 설정된 공기 펌프(Model 1532, SKC, TX, USA)로 각 용액을 에어로졸화하는 동시에 HEPA 필터 처리된 30 l/min 용량의 희석 공기를 첨가하여 챔버 안으로 분사하는 방법으로 초기 농도를 조성하였다. 각 측정대상 물질의 초기 농도는 시간 경과에 따른 공기청정기의 제거 효율성을 지속적으로 평가한다는 측면에서 WPS 분석장비의 모니터링을 통해 최대한 고농도로 설정하였으며(>10<sup>5</sup> N/cm<sup>3</sup>), 이러한 농도에 도달하기 위해 소요되는 분사 시간은 약 15-20분 정도였다. 챔버 안에 조성된 초기 농도는 태워 지거나 분사된 입자상 물질의 공기 중 분포 양상을 일정하게 유지하기 위해 10-15분 동안의 안정화 기간을 거친 후 측정하였다.

#### 1) NaCl

NaCl stock solution의 경우 다결정 형태의 NaCl 입자(Fisher Chemical, Fair Lawn, NJ, USA) 20 g을 증류수 400 ml에 용해시켜 제조하였다. NaCl 용액 살포시 평균 입자 크기는 0.3-3 μm로 실험 전에 WPS 분석 장비를 통해 예비 측정되었으며, 이 입자 범위는 다양한 종류의 부유 미생물 크기에 해당된다.<sup>11)</sup>

#### 2) MS2 바이러스

MS2 바이러스의 크기, 모양, 핵산 유무 등의 특성이 장내 바이러스의 특성과 유사하다. 이러한 이유로 MS2 박테리오파지는 이미 오래전부터 소아마비 병원체 바이러스(poliiovirus)나 다른 많은 장내 바이러스의 대용물로 활용되어 왔다.<sup>12-14)</sup> 분사될 MS2 바이러스 stock

solution은 건조된 바이러스 파지(ATCC 15597-B1)에 고순도 필터 처리한 Luria-Bertani broth 용액 9 mL를 넣어 제조하였다. 이 현탁액을 희석한 후 숙주 박테리아로 *Escherichia coli*(ATCC 15597와 CC3000 균주)와 반응시킨 후 농도가  $10^8$ - $10^9$  PFU(Plaque Forming Unit)/mL 범위에 해당되는 것을 본 연구에 이용하였다.

### 3) *Pseudomonas fluorescens* 균주

*P. fluorescens*는 호흡기 계통 병원성 감염을 유발하는 주요 요인 중 하나인 *P. aeruginosa*의 대용물로 알려져 있으며, 실내 환경에 우점하는 박테리아로 분석실에서 취급하기가 용이하기 때문에 실험시 객관적인 연구 결과를 제공해 주는 이유에 여러 연구자들에 의해 많이 활용되어 왔다.<sup>15-17)</sup> 멸균된 Trypticase Soy Broth (TSB; Becton, Dickinson and Co., Sparks, MD, USA) 용액 200 mL에 Tryptic Soy Agar(TSA) 배지에서 순수 배양된 *P. fluorescens*(ATCC 13525)를 loop을 이용하여 2번 접종하였다. 접종한 이 용액은 30°C로 설정된 Gyrotory water bath shaker(G76, New Brunswick Scientific Inc., Edison, NJ, USA)에 18시간 동안 배양하였다. 배양 후 고압 멸균된 고순도 처리수로 필터 처리한 다음 7,000 rpm 조건하에서 7분 동안 원심분리하였다. 이 현탁액을 희석한 후 Hemacytometer로 농도가  $10^8$ - $10^9$  bacterial cells/mL 범위에 해당되는 것을 본 연구에 이용하였다.

## 3. 제거 효율 지표

각 입자상 물질에 대한 본 공기청정기의 제거 효율성을 산출하기 위해 다음과 같은 두 가지 지표를 적용하였다.

### 1) ACF(Air Cleaning Factor)

본 지표는 환기에 의한 외부 공기의 유입이 차단된 챔버 조건하에서 공기청정기의 입자상 물질에 대한 제거 효율성을 나타내기 위해 이용되었다. 공기청정기를 배제한 상태에서 중력에 의해 자연 침강되어 감소된 공기 중 입자상 물질의 농도( $C_{Natural}$ )에 대한 공기청정기의 가동을 통해 감소된 공기 중 입자상 물질의 농도( $C_{AP}$ )의 비로 각 실험마다 초기 농도 수치가 다르기 때문에 실제 측정된 농도 값이 아닌 경과 시간에 따른 농도( $C_t$ )와 초기 농도( $C_0$ )의 비를 적용하였으며 따라서 산출식은 아래와 같다.

$$ACF = \frac{(C_t/C_0)_{Natural}}{(C_t/C_0)_{AP}}$$

### 2) CADR(Clean Air Delivery Rate)

ACF와 더불어 공기청정기의 공기 오염물질에 대한

제거 효율성을 평가하기 위한 또 하나의 방법으로 입자상 물질로 오염된 실내 공간을 공기 희석 방법으로 정화하기 위해 내부로 유입되는 깨끗한 공기의 양을 산정하는데 일반적으로 적용되어 왔다.<sup>18-20)</sup> 따라서 본 지표는 환기가 이루어지는 챔버 실험의 경우에 적용하였으며, CADR의 정의는 다음과 같다.

$$CADR = V (k_c - k_n)$$

여기서,

V: 실내 공간의 용적

$k_c$ : 공기청정기 가동에 따른 입자상 물질 농도의 저감 상수

$k_n$ : 공기청정기 가동 없이 중력 침강에 의해 발생하는 입자상 물질 농도의 저감 상수

그리고 저감 상수는 아래와 같이 정의된다.

$$(1/t) \ln(C_0/C_t)$$

여기서,

t: 시간

$C_0$ : 초기 입자상 물질의 농도

$C_t$ : 특정 시간(t)에서 측정된 입자상 물질의 농도

본 저감상수는 aerosol의 종류에 관계없이 공기청정기 가동 유( $k_c$ ) 무( $k_n$ )에 의한 차이만 있을 뿐 산출식 및 자료의 정도관리 방안은 동일하다.

## 4. 통계 처리

SAS package program을 이용한 분산분석 방법을 통해 입자상 물질의 종류에 따른 본 공기청정기의 제거 효율성을 비교 평가하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 물리적 특성의 입자상 물질 제거 효과

Fig. 1은 환기가 되지 않은 24.3 m<sup>3</sup> 밀폐형 챔버 안에서 본 공기청정기가 2시간 동안 가동시의 NaCl 입자에 대한 입경별 농도 변화 추이를 보여주고 있다. 실험 결과 NaCl 입자의 입경 크기에 따라 농도 저감률이 상이했으며, 공기청정기에서 발생하는 음이온에 의한 NaCl 입자 물질의 농도가 현저하게 저감됨이 관찰되었다. 가령, 입자 크기가 0.041 μm인 경우 공기청정기 가동 후 40분 내에 초기 농도 6.09×10<sup>4</sup> N/cm<sup>3</sup>에서 0.41×10<sup>4</sup> N/cm<sup>3</sup>으로 감소되었고, 이보다 큰 0.499 μm 입자의 경우 5.22×10<sup>5</sup> N/cm<sup>3</sup>에서 0.17×10<sup>5</sup> N/cm<sup>3</sup>으로 저감되었다. 따라서 전체적인 입경별 측면에서 NaCl 입

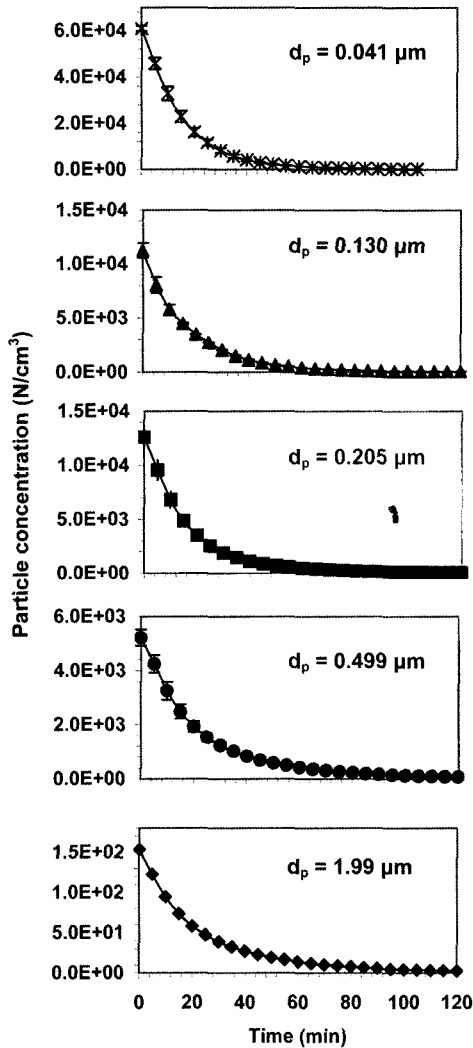


Fig. 1. Decay of the NaCl aerosol concentration in the 24.3 m<sup>3</sup> chamber with the hybrid-type of air purifier unit. No ventilation in the chamber, the initial total aerosol concentration =  $1.50 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ .

자의 본 공기청정기에 의한 저감율은 가동 1-2시간 내에서 초기 농도에 비해 10-100배 정도로 감소되는 것으로 분석되었다. 특히 초기 입자상 물질의 농도가 높을수록 공기 중 음이온과 입자들간의 상호반응이 커지기 때문에 본 공기청정기에 의한 실내공기 정화 능력이 증가한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구 결과에 근거한다면 음이온에 의한 입자상 물질의 저감 효과는 초기 농도가 높을수록, 공기청정기로부터의 음이온 발생량이 클수록 더욱 현저하게 될 것이라 판단된다. 또한 음이온에 의한 공기 정화는 상대적으로 입자상 물질에

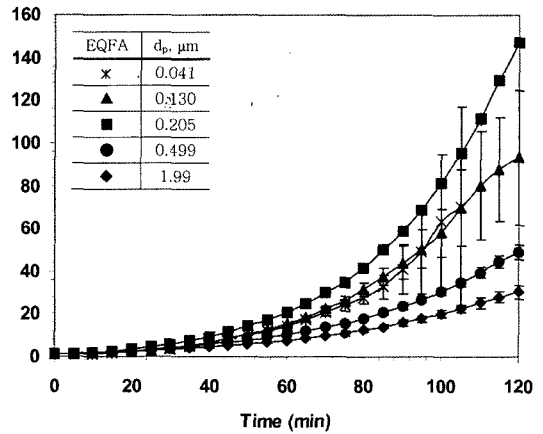
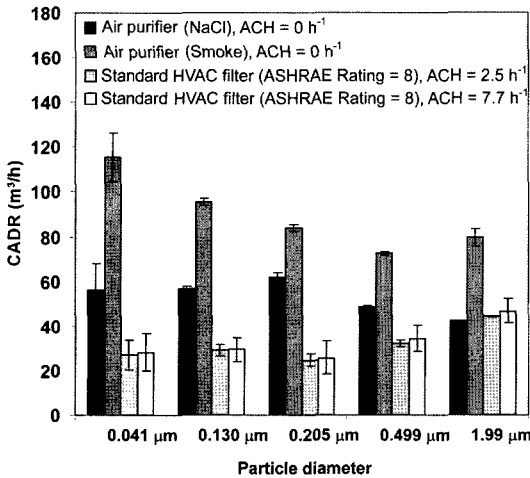


Fig. 2. The ion-induced ACF as a function of time and particle size. The hybrid-type of air purifier unit operates in the 24.3 m<sup>3</sup> chamber with NaCl aerosol ( $C_0 = 1.50 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ). No ventilation.

의한 공기 오염도가 높은 실내 공간에서 더 효과적이라 사료된다. 그 이유는 실내 공간내 입자 농도가 높을수록 음이온에 의한 공간내 전하 충전 효과가 더 빠르게 진행되어 이로 인해 증폭된 전기장 영역이 입자상 물질을 이동시키거나 침전시켜 실내 표면에 흡착되게 하는 긍정적 효과를 제공해 줄 수 있기 때문이다.<sup>21)</sup> 그러므로 음이온 방식에 의한 공기청정기는 공기 중 입자상 물질의 농도가 일상 주거 환경보다 상대적으로 높은 실내 공간에서 더 효과적이라 유추된다. 대신 낮은 수준의 입자상 물질 농도 범위를 보이는 실내 공간에서 이를 더 저감하기 위해 음이온 방식의 공기청정기를 적용하는 것은 비효율적이라 생각된다. 다시 말해, 입자상 물질에 의해 실내 공기가 오염된 공간에서는 음이온 방식의 공기청정기가 효과적이나, 일반 수준의 실내 환경을 보다 더 청정화 상태로 향상시키기 위한 방안으로 본 공기청정기를 활용하는 것은 경제성이 떨어지는 수단이라 할 수 있다.

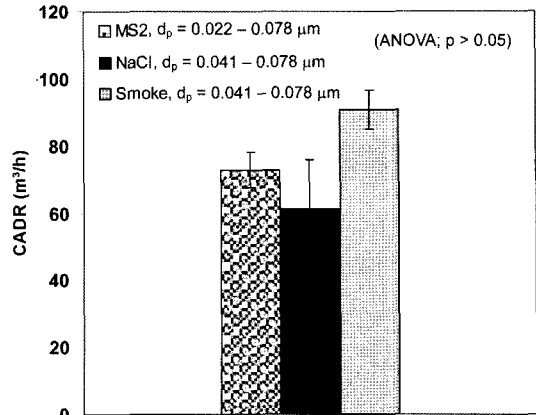
Fig. 2는 NaCl 입자를 입자상 오염물질이라 가정했을 때 공기청정기 가동 시간에 따른 입경별 ACF의 변화 양상을 보여주고 있다. 본 연구 결과에 근거서 실내 공간의 용적이 약 25 m<sup>3</sup>이라고 가정하면 본 공기청정기 가동 2시간 후 ACF는 30-100에, 이보다 2배 큰 실내 공간에서는 15-70에 도달할 것으로 예측된다. 따라서 비슷한 ACF 수준이 용적이 큰 실내공간보다 상대적으로 작은 실내공간에서 더 빨리 도달하게 됨을 알 수 있었고, 이러한 실험 결과는 이온화 방식 적용을 통한 입자상 물질의 저감 모델<sup>22)</sup>과 일치하였다. 또한 Fig. 2는 본 공기청정기에 의한 ACF가 입자상 물질의 크기



**Fig. 3.** Clean Air Delivery Rate (CADR) determined for the NaCl and smoke aerosols from the tests conducted in non-ventilated 24.3 m<sup>3</sup> chamber. The performance of the hybrid-type of air purifier unit is compared to that of a standard HVAC filter (ASHRAE Rating = 8) installed in the close loop air exchange system of the chamber.

에 따라 상이하며, 특히 0.3 µm 이하의 미세입자에 있어 그 증가 효과가 현저함을 제시해 주고 있어 음이온 방식과 광촉매 산화방식이 접목된 공기청정기의 제거 효율성은 입자크기가 작은 경우에 더욱 효과적임을 암시해 주고 있다. 이 크기에 해당되는 입자상 물질들은 인간의 호흡에 의해 체내로 유입되어 건강상의 악영향을 미칠 수 있는 유해인자들이므로 노출 수준을 억제한다는 측면에서 본 공기청정기의 활용 효과가 매우 높다고 할 수 있다.

Fig. 3은 24.3 m<sup>3</sup>의 챔버에서 2시간 동안 본 공기청정기를 가동한 후의 CADR을 산출하여 NaCl 입자와 smoke 입자간의 저감 효율성 및 NaCl 입자상 물질을 대상으로 공기청정기 가동 없이 실제 주거 환경에서 적용되는 기계적 환기에 의해서만 나타난 제거율과 공기청정기만을 가동하여 나타난 제거율을 비교 평가한 것이다. 본 연구에 적용된 환기 방식은 HVAC 필터 (ASHRAE Rating 8)에 의한 것으로 적정 환기율(2.5 ACH)와 높은 환기율(7.7 ACH) 조건하에서 실험을 수행하였다. 연구 결과 NaCl 입자 크기에 관계없이 NaCl 입자보다는 smoke 입자에 있어 공기청정기의 제거 효과가 1.5-2배 정도 높음이 관찰되었고, 전반적으로 공기청정기에 의한 CADR이 일반 주거 환경에 적용되는 HVAC 필터에 의한 CADR보다 약 2배 이상 높은 것으로 분석되었다. Smoke 형태의 입자상 물질이



**Fig. 4.** Clean Air Delivery Rate (CADR) determined for the MS2 virus aerosol from the tests conducted in non-ventilated 2.75 m<sup>3</sup> chamber. The performance of the hybrid-type of air purifier unit is compared to that of smoke and NaCl aerosols of same size range measured in a non-ventilated 24.3 m<sup>3</sup> chamber.

NaCl 입자 보다 공기청정기에 의한 저감 양상이 높게 나타난 이유는 두 물질이 가지고 있는 다른 입경 분포 특성에 의한 것으로 음이온 방출에 의해 생성되는 전기장 영역에 NaCl 입자보다는 smoke 입자가 더 빠른 속도로 반응하여 내부 표면에 더 쉽게 침착되는 것으로 추정된다. 또한 본 공기청정기에서 방출되는 음이온에 의한 물리적 특성의 입자상 물질 저감 효과는 환기가 이루어지지 않는 실내 공간에서 더욱 높을 것이라 예측된다. 본문에서 연구 결과를 제시하지는 않았으나 일상 주거 환경에 적용되는 공기 전환율(ACH) 보다 높은 7.7 h<sup>-1</sup>을 본 공기청정기 가동 없이 적용한 챔버의 ACF는 1시간 후 6.6으로 조사되었다. 이 수치는 환기 없이 본 공기청정기만을 가동하여 2시간 후 분석된 ACF 26과 거의 상응하거나 오히려 더 낮은 수치라 할 수 있다. 따라서 본 공기청정기의 효과를 극대화하기 위해서는 일반 수준보다 환기가 불량한 실내공간에 활용해야 할 것으로 판단된다.

**2. 생물학적 특성의 입자상 물질 제거 효과**

다른 용적의 챔버 실험을 통해 얻어진 공기청정기의 저감 효율성을 더 객관적으로 평가하기 위해서는 ACF 보다는 CADR이 더 적절한 지표이기 때문에 바이오에어로졸 관련 연구에서는 CADR 개념을 적용하였다. Fig. 4는 본 공기청정기를 2시간 가동한 후의 MS2 바이러스의 CADR을 보여주고 있으며, 물리적 특성의 입자상 물질과의 제거 효율성을 비교하기 위해 MS2 바이러스 입자의 평균 크기 범위(0.022-0.078 µm)에 상응

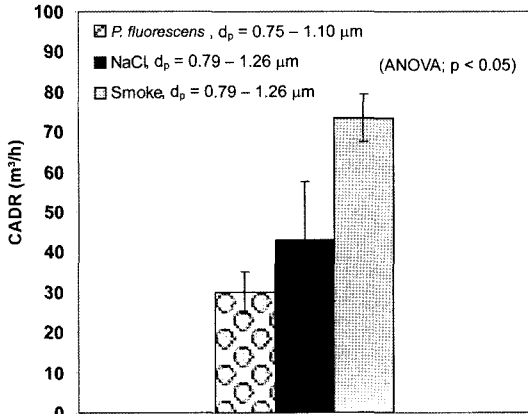


Fig. 5. Clean Air Delivery Rate (CADR) determined for the *Pseudomonas fluorescens* aerosol from the tests conducted in non-ventilated 2.75 m<sup>3</sup> chamber. The performance of the hybrid-type of air purifier unit is compared to that of smoke and NaCl aerosols of same size range measured in a non-ventilated 24.3 m<sup>3</sup> chamber.

하는 NaCl과 smoke의 CADR도 동시에 나타내 주고 있다. MS2 바이러스의 CADR 평균값은 72.8±5.2로 smoke 입자의 CADR(89.3±5.7)보다는 낮았고 NaCl 입자의 CADR(60.8±8.4)보다는 높았으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다(p>0.05). 따라서 본 공기청정기의 입자상 물질의 제거 효율성은 NaCl과 smoke 같은 물리적 입자상 물질 뿐 아니라 공기 중 바이러스와 같은 생물학적 입자상 물질에도 거의 동일하게 작용하는 것으로 분석되었다.

*P. fluorescens* 균주의 경우(Fig. 5)도 비록 평균 CADR (29.8±3.6)이 MS2 바이러스보다는 낮았으나, *P. fluorescens* 균주 입자의 평균 크기에 상응하는 NaCl과 smoke 입자간의 CADR 값을 서로 비교한 결과 통계적으로 차이가 없는 것으로 분석되어(p>0.05) MS2 바이러스의 경우와 마찬가지로 본 공기청정기에 의한 공기 중 박테리아의 제거 효율성이 물리적 특성의 입자 물질과 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 다만 *P. fluorescens* 균주와 물리적 특성의 입자들간에 CADR 차이가 나타난 이유는 입자 형태의 상이함에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 *P. fluorescens*는 막대 형태(rod-shape)의 박테리아인 반면 NaCl과 smoke는 상대적으로 구형 형태(spherical shape)의 비생물학적 입자이기 때문에 음이온에 의해 생성된 전기장 부하와 반응하는 양상이 서로 다르기 때문이라 사료된다.

본 연구에서는 생물학적 입자상 물질에 대한 공기청정기의 제거 효율을 부유 미생물의 입자 크기 측면에

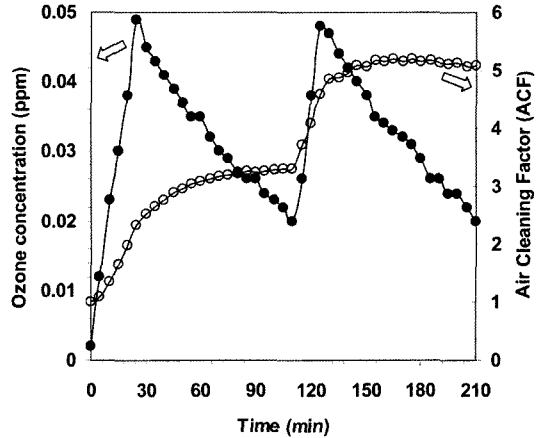


Fig. 6. The effect of intermittent operation of hybrid-type of air purifier unit on the ozone concentration and the concentration decay of NaCl aerosol in a non-ventilated 24.3 m<sup>3</sup> chamber.

서 평가하였으나, 보다 실질적이고 객관적으로 평가하기 위해서는 그것의 생리 활성도를 고려한 배양 방법이 향후 연구에서는 동시에 적용되어야 할 것이다.

### 3. 오존 농도 변화에 따른 입자상 물질의 제거 양상

Fig. 6은 실내 오존 유지 농도 0.05 ppm을 초과하지 않는 범위에서 본 공기청정기를 연속적이 아닌 단속적으로 가동했을 때 전체 NaCl 입자의 ACF 변화 양상을 보여주고 있다. 공기청정기를 가동하다 중단된 시기에 도 가동되는 시기 만큼은 못하나 ACF의 증가가 중력에 의한 자연 침강 저감률보다 높았으며, 가동과 중단을 반복함에 따라 ACF는 계속해서 증가하는 것으로 조사되었다. 따라서 본 공기청정기를 실제 일반 환경에서 활용할 수 있는 대안은 실내 오존 농도가 0.05 ppm을 초과하지 않는 범위 내에서 단속적으로 작동시키는 것이다. 즉, 실내 오존 농도가 0.05 ppm이 될 때까지 본 공기청정기를 가동하다 극대점에 도달하게 되면 자동적으로 가동이 멈추고, 다시 초기 오존 농도로 감소하게 되면 다시 가동하게 되는 공기청정기 자체 내 오존 농도 센서 기능이 부여된 자동 전원 센서 시스템의 도입이 요구되는 바이다.

## IV. 결 론

물리적인 요인에 의해 발생한 입자상 물질인 NaCl을 대상으로 음이온 방식과 UV 조사를 통한 광촉매 산화 공법이 적용된 공기청정기의 제거 효율성을 평가한 결과, 음이온에 의한 저감 효과는 초기 농도가 높을수록,

입경 크기가 큰 입자보다는  $\mu\text{m}$  이하의 작은 미세입자일수록, 적용되는 실내공간의 용적이 작을수록, 그리고 공기청정기로부터의 음이온 발생량이 클수록 더욱 현저한 결과를 도출해 낼 수 있음을 알 수 있었다. 또한 입자상 물질에 의한 공기 오염도가 일상 주거 환경보다 상대적으로 높고 환기가 원활히 이루어지지 않는 실내공간일수록 더 효과적인 제거 효율을 기대할 수 있었다. 공기 중 바이러스나 박테리아와 같은 생물학적 입자상 물질의 제거 효율은 물리적 입자상 물질과 비교시 통계적으로 차이가 없는 것으로 분석되었다. 공기청정기를 가동하다 중단된 시기에도 가동되는 시기 만큼은 못하나 ACF의 증가가 중력에 의한 자연침강 저감률보다 높은 것으로 나타났으며, 가동과 중단을 반복함에 따라 ACF와 CADR은 계속해서 증가하는 것으로 조사되었다.

### 감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-214-F00017).

### 참고문헌

- 김기연, 박재범, 김치년, 이경중 : 서울시 일부 지하철역 내 분포하는 부유 세균 및 입자상 오염물질 평가. 한국환경보건학회지, **32**, 254-261, 2006.
- 이철민, 김윤신, 이태형, 김종철, 김중호 : 확률론적 모의실험을 이용한 공기청정기의 실내공기중 PM10과 NO<sub>2</sub> 제거효율에 관한 연구. 한국환경보건학회지, **30**, 221-229, 2004.
- 김대원, 김문현, 양원호 : 차량 운전자의 공기오염물질 잠재적 노출 및 차량용 공기청정기에 의한 제어. 한국환경보건학회지, **30**, 481-486, 2004.
- Lin, C. Y. and Li, C. S. : Effectiveness of titanium dioxide photocatalyst filters for controlling bioaerosols. *Aerosol Science and Technology*, **37**, 162-170, 2003.
- 소비자시대 : 공기청정기의 종류와 장단점. 11월호, p. 24-27, 2002.
- 환경부 : 공기청정기 오존 안전성 검증 서비스 실시. 보도자료, 2006.
- de Mik, G. and de Groot, I. : The germicidal effect of the open air in different parts of the Netherlands. *Journal of Hygiene*, **78**, 175-211, 1977.
- Heindel, T. H., Streib, R. and Botzenhart, K. : Effect of ozone on airborne microorganisms. *Journal of Hygiene*, **194**, 464-480, 1993.
- Kowalski, W. J., Bahnfleth, W. P. and Whittam, T. S. : Bacterial effects of high airborne ozone concentrations on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Ozone Science and Engineering*, **20**, 205-221, 1998.
- Hu, F. B., Persky, V., Flay, B. R. and Richardson, J. : An epidemiological study of asthma prevalence and related factors among young adult. *British Medical Journal*, **34**, 67-76, 1997.
- Reponen, T., Willeke, K., Grinshpun, S. and Nevalainen, A. : Biological particle sampling. In: Baron, P.A. and Willeke, K. (eds) *Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications*. 2nd edn, New York, Wiley Interscience, 751-777, 2001.
- Griffiths, W. D., Bennett, A., Speight, S. and Parks, S. : Determining the performance of a commercial air purification system for reducing airborne contamination using model micro-organisms: a new test methodology. *Journal of Hospital Infection*, **61**, 242-247, 2005.
- Tanner, B. D., Brooks, J. P., Haas, C. N., Gerba, C. P. and Pepper, I. L. : Bioaerosol emission rate and plume characteristics during land application of liquid class B biosolids. *Environmental Science and Technology*, **39**, 1584-1590, 2005.
- Tseng, C. C. and Li, C. S. : Inactivation of virus-containing aerosols by ultraviolet germicidal irradiation. *Aerosol Science and Technology*, **39**, 1136-1142, 2005.
- Wang, Z., Reponen, T., Grinshpun, S. A., Gorny, R. L. and Willeke, K. : Effect of sampling time and air humidity on the bioefficiency of filter samplers for bioaerosol collection. *Journal of Aerosol Science*, **32**, 661-674, 2001.
- Agranovski, V., Ristovski, Z., Hargreaves, M., Blackall, P. J. and Morawska, L. : Performance evaluation of the UVAPS: influence of physiological age of airborne bacteria and bacterial stress. *Journal of Aerosol Science*, **34**, 1711-1727, 2003.
- Mainelis, G., Berry, D., An, H. R., Yao, M. S., DeVoe, K., Fennell, D. E. and Jaeger, R. : Design and performance of a single-pass bubbling bioaerosol generator. *Atmospheric Environment*, **39**, 3521-3533, 2005.
- Shaughnessy, R. J., Levetin, E., Blocker, J. and Sublette, K. L. : Effectiveness of portable indoor air cleaners: sensory testing results. *Indoor Air*, **4**, 179-188, 1994.
- Foarde, K. K., Myers, E. A., Hanley, J. T., Ensor, D. S. and Roessler, P. F. : Methodology to perform clean air delivery rate type determinations with microbiological aerosols. *Aerosol Science and Technology*, **30**, 235-245, 1999.
- Ward, M., Siegel, J. A. and Corsi, R. L. : The effectiveness of stand alone air cleaners for shelter-in-place. *Indoor Air*, **15**, 127-134, 2005.
- Lee, B. U., Yermakov, M. and Grinshpun, S. A. : Removal of fine and ultrafine particles from indoor air environments by the unipolar ion emission. *Journal of Aerosol Science*, **38**, 4815-4823, 2004.
- Mayya, Y. S., Sapra, B. K., Khan, A. and Sunny, F. : Aerosol removal by unipolar ionization in indoor environments. *Journal of Aerosol Science*, **35**, 923-941, 2004.