

확률론적 모의실험을 이용한 공기청정기의 실내공기중 PM10과 NO₂ 제거효율에 관한 연구

이철민[†] · 김윤신 · 이태형 · 김종철 · 김종호*

한양대학교 환경 및 산업의학연구소, *삼성전자(주) 시스템가전사업부

Efficiency of Removal for PM10 and NO₂ by Air Cleaner in Residential Indoor Environment with Monte-Carlo Simulation

Cheol-Min Lee[†] · Yoon-Shin Kim · Tae-Hyung Lee · Jong-Cheol Kim · Jung-Ho Kim*

Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University

**SAMSUNG ELECTRONICS Co., LTD*

(Received May 10, 2004; Accepted July 10, 2004)

ABSTRACT

We estimated decreasing rate of indoor air pollutants which are PM10 and NO₂ by the air cleaner in indoor environment. This study respectively examined concentration of PM10 and NO₂ two times in 34 sites located in Seoul and Kyung-gi Do from April to September in 2003. Sectional period was respectively divided for operating the air cleaner and non-operating the air cleaner. Moreover, questionnaire was executed to grasp physical characteristic of objective building and residential characteristic of residents by using method of self-entry. There was a trend that concentration of PM10 and NO₂ separated number of residents during operating period respectively decreased among indoor air. According to the existence of smoker in indoor, both concentration of PM10 and NO₂ during operating period decreased in each case, and according to existence of pets, both cases decreased concentration of pollutants by operating the air cleaner. We used Monte-Carlo simulation to remove uncertainty and identify efficiency of eliminated pollutants such as PM10 and NO₂ by the air cleaner. Average efficiency of removal for PM10 and NO₂ were $61.84 \pm 23.04\%$ and $48.67 \pm 18.03\%$ respectively.

Keywords: PM10, NO₂, Air cleaner, Real residential environment, Monte-Carlo simulation

I. 서 론

실내공기오염에 대한 문제의 발생 배경은 각종 산업 분야에서 에너지 절약 및 효율을 높이기 위해 밀폐화와 에너지 절감 장치를 설치하는 건물의 증가로 인하여 실내공기의 질이 악화됨에 따라 발생된 것이다. 실제로 에너지 절약형 건물은 외부로부터의 공기 침투를 막는 것에 초점을 맞추어 건축되었고, 에너지 절약형의 산업용 건물에서는 건물의 유지 관리비를 줄이기 위해 의도적으로 환기량을 감소시키기도 하여 공기의 유입과 환기량이 감소되어 자연히 실내공기가 오염되고 있

다. 이러한 추세에 부응하여 최근 주택 공급업체에서는¹⁾ 자연주택 또는 그린빌딩(Green building) 등과 같이 주거환경 내에서의 건강에 대한 관심이 높아지고 있다.²⁾ 그린빌딩이란 에너지 절약과 환경보전을 목표로 에너지부하 저감과 고효율설비, 자원 재활용과 환경공해 저감 기술 등을 적용하여 자연 친화적으로 설계·건설하고, 유지·관리한 후, 건물의 수명이 끝나 해체될 때까지도 환경에 대한 피해가 최소화 되도록 계획된 건축물로 정의된다.³⁾ 1992년도 설립된 그린빌딩 관련 국제협의체(GBC : Green Building Challenge)에서 국제 공통의 그린빌딩 인증기관 개발 및 보급을 추진하고 있으며, 우리나라도 이 GBC에 가입하여 활동하고 있다. 그린빌딩 평가항목은 자원소비, 환경부하, 실내환경, 장기내구성, 공정관리, 그린환경요소로 구성되어 있다. 그 중 환경부하는 대기오염물질 즉, CO₂,

[†]Corresponding author : Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University
Tel: 82-2-2290-1510, Fax: 82-2-2294-0160
E-mail : spica@ihanyang.ac.kr

SO₂, NO_x, 입자상물질과 고형폐기물, 생활하수, 기타 부하 등이며, 실내환경은 공기환경, 온도환경, 시각 환경, 음향 환경 등으로 구성되어 있다.⁴⁾ 또한 실내공기오염의 문제를 해결하기 위한 또 다른 제시 방안으로는 공기청정기의 개발 및 이용이다. 실내공기오염의 문제를 해결하기 위해 개발된 공기청정기는 사무실 환경에서는 건물내 환기시설에 직접 설치하여 중앙공급식으로 사용하고, 일반 주거환경에서는 단독으로 개발된 소형 공기청정기를 사용하고 있다.⁵⁾

일본의 JIS C 9615⁶⁾와 한국의 KS C 9314⁷⁾에서는 공기청정기를 '일반가정, 사무실 등에 설치하여 공기 중에 부유하는 분진을 포집하거나 또는 이와 병행하여 가스를 제거(탈취)하기 위하여 사용되는 송풍기 내장의 장치'로 정의하고 있다. 이러한 공기청정기의 종류는 Pre-Carbon Filter와 Hepa Filter를 이용한 기계식, Corona 방전에 의한 집진판을 이용한 전기식, 그리고 이 두 종류를 병행한 복합식으로 나눌 수 있다. 2002년 KS규격(KS C 314)이 개정되고, 공기청정협회(한국환경재단)를 중심으로한 전문가들에 의해 공기청정협회규격(KACA 1998-01)이 개정되었기 때문에 그동안 평가지침등의 혼란 발생한 청정기 성능의 문제등도 점점 개선되어 나갈 것으로 본다.

현행 국내에 시판되는 가정 및 사무실에 설치하는 단독형 공기청정기의 성능에 관한 평가는 시판 사의 실험실의 챔버 실험결과에 의존하고 있는 실정으로 다양한 실내공기오염 발생요인 및 혼란요소 등이 통제되지 않은 실제 실내환경에서의 성능평가에 관한 연구는 전무한 실정에 있다. 이에 본 연구에서는 국내에서 시판되는 단독형 공기청정기를 실제 거주환경에 설치하고 가동 전후의 실내공기오염물질의 농도조사를 통한 실제 거주환경에서의 공기청정기의 성능을 평가하여 제시함으로써 향후 실내공기질 연구분야의 공기청정기 관련 연구에 있어 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구기간 및 연구방법

본 연구는 2003년 4월부터 동년 9월까지 5개월간 서울시 및 경기도 지역에 위치한 주택 34곳을 무작위로 선정하여 각 2회씩 공기청정기 가동 전/중의 오염물질의 농도를 조사하였다. 공기청정기 가동 전과 중의 구분기간은 각각 2주로 하였으며, 각 기간 내에 무작위로 선정하여 측정을 수행하였으며 조사 대상 건물의 물리적 특성 및 거주자의 거주특성을 파악하기위해 직접 방문을 통한 피조사자의 자기기입방법을 이용하여 설문 조사를 실시하였다. 또한 조사대상오염물질로는 호흡성

분진(respirable suspended particulate)으로 알려진 PM10과 일반 가정에서 취사용 연소기구, 흡연, 난방연료(나무, 석탄, 기름, 가스 등)의 연소시 발생하는 것으로 알려진 이산화질소를 선정하였으며, 각 오염물질의 측정은 다음과 같은 방법을 이용하여 측정하였다.

PM10의 측정은 질량농도 측정기(Modol : GT-331, SHIBATA)를 이용하여 20분 간격으로 연속적으로 24시간 농도를 측정하였으며, NO₂는 수동식 시료채취기(Passive sampler, Toyo Roshi Kaisha, Ltd. Japan)를 이용하여 1일 동안 노출 후 외부 공기가 유입되지 않도록 밀봉한 후 실험실에 돌아와 분석을 실시하였다. 각 측정기의 측정위치는 연소장치 발생원으로부터 3m 이상 그리고 창문 또는 문으로부터 2m 이상이 되도록 하였으며, 지상으로부터 1m 이상 높이에서 사람의 호흡기 영역에 설치하였다.

질량농도 측정기는 광산란법 즉, 대기 중에 부유하고 있는 입자상 물질에 빛을 조사하면 입자상 물질에 의하여 빛이 산란하게 되며 물리적 성질이 동일한 입자상 물질에 빛을 조사하면 산란광의 양은 질량농도에 비례한다는 원리를 이용하여, 산란광의 양을 측정하고 그 값으로부터 입자상 물질의 농도를 산출하는 방법을 이용하였다.

NO₂ 농도산출을 위한 NO₂ 수동식 시료채취기의 크기는 5×4×1 cm³, 15 g이며, 시료채취기 안에 셀룰로오스 여지의 TEA(triethanolamine) 용액에 NO₂가 흡수된다. Sulfanilic acid 5 g, phosphoric acid(85%) 50 ml와 NEDA(N-(1-Naphtyl) ethylene-diamine dihydrochloride, 98%) 0.05 g을 이용하여 color reagent(azodyc-forming) 1 l를 제조하였다. 수동식 시료채취기는 NO₂가 존재하지 않는 챔버에서 분해하여 셀룰로오스 여지를 시험관에 넣고, color reagent 10.0 ml를 시험관에 주입하였다. NO₂ 농도 계산식에 이용된 물질 전환계수 값은 0.10 cm/sec를 이용하였으며, 정량분석은 photospectrometer(Model 명...)를 이용하여 545 nm 파장에서 측정하였다. NO₂의 농도계산에 사용된 식은 다음과 같다.⁸⁾

$$C = \frac{M \times R \times T}{K_{og} \times A \times t}$$

여기서 K_{og} = 질량변환계수(cm/sec)

M = 흡수된 NO₂ nano-mol

R = 기체상수(atm · L/mol · K)

T = 절대온도(K)

A = 단면적(cm²)

t = 노출시간(hour)

C = 이산화질소 농도(ppb)

11 Step Cleaning System

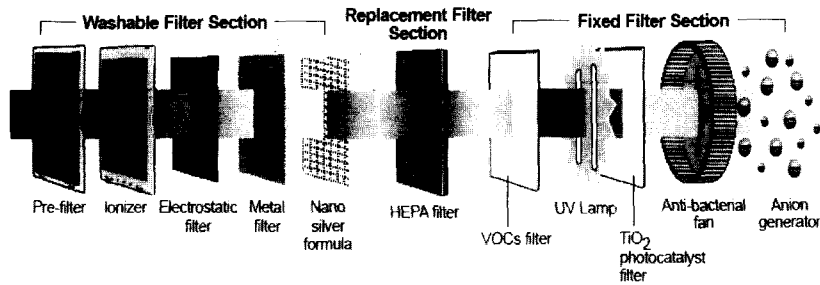


Fig. 1. Basic system of the air cleaner.

2. 공기청정기

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 공기청정기의 개략도를 나타낸 것으로 3부(세척필터부, 교환필터부, 고정필터부), 12단계(큰먼지필터, 이온화부, 정전필터, 제균필터, 은 나노코팅, HEPA 필터, 기능성 필터, 광촉매 탈취필터(1), 제균램프, 광촉매 탈취필터(2), 항균 팬, 음이온)로 구성되어 있으며, 각 단계별 성능을 살펴보면, 큰먼지 필터는 공기중에 부유하는 큰 먼지(이불먼지, 동물털)를 1차적으로 제거하고, 제균 이온화부는 +5 kV의 텅스텐 와이어와 접지 전극에 의해 발생하는 코로나 방전으로 공기와 함께 들어오는 각종 세균이나 먼지를 대전시켜 주며, 정전 필터는 대전된 먼지를 영구적으로 정전기를 띄고 있는 정전 필터에 의해 집진한다. 제균 필터(금속필터)는 스테인레스 스틸 섬유로 만들어진 금속 필터에 의해 집진과 동시에 살균력을 강화하는 기능을 가지고 있으며, 8 nm의 은입자를 필터에 코팅하여 표면적을 증가시켜 흡입되는 공기중의 세균을 은의 살균효과로 제거하게 만들었다. HEPA 필터는 세척 필터부를 통과한 극미량의 미세먼지까지 완벽하게 집진을 이루게 하여 항상 깨끗한 공기만을 만들어내는 작용을 하며, 기능성 필터는 실내의 인테리어 등에서 발생하는 휘발성유기화합물질이나 악취가 많이 나는 특수 환경에서 사용할 목적으로 가스상 물질을 전문적으로 제거하는 전문 필터이다. 광촉매 탈취필터(1)는 일반적인 냄새를 유발시키는 유기물을 분해하여 악취를 제거하는 필터로 자외선에 의해 재생되므로 반영구적인 수명을 지니고 있으며, 제균 램프는 광촉매 필터를 재생시키는 역할과 동시에 자외선에 의한 살균기능을 동시에 수행하는 기능을 가지고 있다. 광촉매 탈취 필터(2)는 자외선 램프의 뒤쪽에 위치하여 자외선 램프 앞에 위치한 필터와 같이 2차로 일반적인 냄새를 유발시키는 유기물을 분해하여 악취를 제거하는 필터로 자

외선에 의해 재생되므로 반영구적인 수명을 지니고 있으며, 항균 팬은 최종 배출되는 공기를 항균 기능을 장착한 팬으로 항상 깨끗한 공기만을 배출한다. 마지막 음이온은 숲 속이나 폭포수에 와 있는 듯한 신선한 느낌을 제공하는 기능을 가지고 있다. 본 연구에서 사용된 공기청정기의 운전유량은 5CMM(m³/min)이다.

3. 자료 분석

설문조사내용은 조사대상자의 일반적 특성을 파악하기 위해 조사대상자의 성별, 연령 등을 조사하였으며, 주거환경 및 거주환경 특성을 파악하기 위해 거주자들의 거주지에서의 평균체류시간, 거주자 수, 거주자들 중 흡연자의 유무, 거주지 내 애완동물의 유무, 주거형태, 환기방식 및 거주 연수 등을 조사하여 각 문항별로 빈도분포를 조사하였다.

공기청정기 가동 전과 가동 중의 오염물질의 저감효과를 평가하기 위해 가동 전의 평균농도와 가동 중의 평균농도간의 차이를 짝비교(paired t-test)를 이용하여 검증하였다. 짝비교는 한 연구대상군에게서 반복 측정된 자료에 대한 평균차이를 검증할 때 사용되는 방법으로 비교하는 그룹의 모집단이 정규분포임을 가정한다. 그러나 대기 중의 오염물질의 농도분포는 정규분포를 띠지 않는 경우가 많기 때문에 이 가정을 확인하지 않고 검증한 결과는 잘못된 해석을 하게 될 수 있다.” 이에 본 연구에서는 공기청정기 가동 전과 가동 중의 실내공기중의 PM10 및 NO₂의 농도분포 특성을 적합도 검정(goodness-of-fit test)을 실시하여 각 오염물질의 분포특성을 파악하였으며, 비정규분포를 나타낸 오염물질에 대해서는 대수변환을 통해 정규분포화하여 공기청정기 가동 전과 가동 중의 평균농도의 차이를 검증하였다. 또한 거주환경 및 주거환경의 특성에 따른 실내공기중의 오염물질의 농도 차이에 대한 평가를 하기

위해 일원분산분석(one-way ANOVA)을 실시하였다.

공기청정기의 오염물질 제거효율을 산출하기 위한 챔버실험에서의 단위시간내의 오염물질 제거효율은 질량수지 법칙을 적용하면 다음과 같은 평형식을 얻을 수 있다.¹⁰⁾

$$V \frac{dC_i}{dt} = P - R - Q_o C_i + C_o Q_i - C_i Q_c \eta$$

여기서 C_i = 청정기 입구 농도

C_o = 청정기 출구 농도

P = 오염물질 생성량

R = 외부에 의한 입자의 제거량

Q_i = 유입공기량

Q_o = 외부로 유출되는 량

Q_c = 공기청정기 유량

η = 공기청정기의 제거효율

V = 실체적

그러나 본 연구는 챔버실험과는 달리 환경요소가 제어되지 않은 실생활공간에서의 공기청정기의 제거효율을 산출하는 연구로 공기청정기 가동 전과 공기청정기 가동 중의 환경이 동일하다는 가정과 가동전의 실내공기오염물질의 농도를 공기청정기 입구농도로, 가동중의 실내공기오염물질의 농도를 공기청정기 출구농도로 가정하여 제거효율을 산출하였으며, 이에 발생하는 불확실성을 제어하기 위해 몬테카를로 모의실험(Monte Carlosimulation)을 이용하였다. 몬테카를로 모의실험은 가능한 상황을 확률분포로 가정하여 이들 분포를 이루는 자료들이 예측 모델내에 계산되어 그 결과물 또한 특정 분포로 예측하는 기법으로,¹¹⁾ 공기청정기 가동전과 가동중의 오염물질 농도분포를 이용하여 실생활의 실내환경에서의 공기청정기의 제거효율 분포를 산출하였다. 또한 공기청정기 가동전에 비해 가동중의 실내오염물질 농도가 높은 사례에 대해서는 당일 평상적인 활동이 아닌 다른 활동 즉 공기청정기 가동 전과 가동중의 실내환경이 동일하지 않다고 가정하여 본 연구에서 제외하였다. 제거효율 산출은 다음과 같은 공식에 의해 산출하였다.

$$\eta = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100$$

여기서 η = 공기청정기의 제거효율(%)

C_i = 공기청정기 가동 전 실내공기오염물질 농도

C_o = 공기청정기 가동 중 실내공기오염물질 농도

III. 결과 및 고찰

1. 설문지 조사 결과

설문조사를 통해 조사대상자의 일반적 특성과 주거환경의 물리적 특성 및 거주환경 특성을 조사하였다. 설문조사에 참여한 사람은 전체 34명(남자 9명, 여자 25명)으로 주택에 거주하는 거주자를 우선적으로 선정하여 실시하였다. 조사대상자의 연령 범위는 23세부터 70세까지로 평균 연령은 47.4±13.5세로 조사되었다. 거주자들의 거주지의 평균 체류시간은 16.6±4.3시간으로, 최소 10시간에서 최대 24시간을 거주지에서 체류하는 것으로 조사되었다. 또한 평균적인 거주자의 수는

Table 1. General characteristics of participants and houses in this study

General characteristics	Mean ± Standard deviation, Number of sample(%)
Sex(person)	
Male	9(26.5)
Female	25(73.5)
age(year)	47.4 ± 13.5
≤ 29	5(14.7)
30~39	5(14.7)
40~49	10(29.5)
50~59	8(23.5)
60 ≤	6(17.6)
Stay time(hour)	16.6 ± 4.3
< 12	8(23.5)
12~14	7(20.6)
15~17	9(26.5)
18~20	4(11.8)
21 ≤	6(17.6)
Resident(person)	3.6 ± 1.1
≤ 3	14(41.2)
4	12(35.3)
5 ≤	8(23.5)
Smoker(household)	
Yes	18(52.9)
No	16(47.1)
Pet animal(household)	
Yes	5(14.7)
No	29(85.3)
Building age(year)	9.1 ± 7.4
Resident duration(year)	5.8 ± 5.8

3.6±1.1명으로 최소 2명에서 최대 6명이 한 거주공간에서 거주하는 것으로 조사되었다. 또한 거주자들 중 흡연자가 있는 주택은 18개(52.9%), 흡연자가 없는 주택은 16개(47.1%)로 조사되었으며, 애완동물을 기르는 주택은 5개(14.7%), 기르지는 않는 주택은 29개(85.3%)로 조사되었다. 주거형태는 개인주택이 12개(35.3%), 공동주택이 22개(64.7%)였으며, 환기방식은 모두 자연환기방식을 이용하는 것으로 조사되었다. 조사대상 건물 대부분은 9.1±7.4년 전에 건축된 건물로 조사되었으며, 평균 거주 연수로는 5.8±5.8년으로 조사되었고, 주택의 평균 평수는 33.2±17.4평으로 조사되었다.

2. 공기청정기 가동 전·중 오염물질의 농도분포 조사

Table 2는 실내공기중 오염물질의 농도분포를 나타낸 것으로 공기청정기 가동 전 PM10의 경우 Extreme value 분포(p=0.565), Gamma 분포(0.218), Logistic 분포(p=0.185)를, 가동 중의 분포는 Lognormal 분포(p=0.978), Weibull 분포(0.789), Gamma 분포(p=0.666)하

는 것으로 조사되었으며, NO₂는 가동 전에 Logistic 분포(p=0.460), Normal 분포(p=0.426), Weibull 분포(p=0.318)를, 가동 중에는 Extreme value 분포(p=0.652), Gamma 분포(p=0.578), Normal 분포(p=0.426)하는 것으로 조사되었다. 이러한 분포조사를 통해 실내공기 중 PM10의 농도분포는 공기청정기 가동 전에 Extreme value 분포에 제1적합하는 것으로 나타났으며, 또한 공기청정기 가동 후의 농도분포는 Lognormal 분포에 제1적합하는 것으로 나타나 실내공기 중 PM10의 농도분포는 공기청정기 가동 전후 모두 꼬리가 오른쪽으로 치우친 농도분포를 하고 있는 것으로 나타났다. 또한 NO₂의 실내공기 중 농도분포는 공기청정기 가동 전에 Logistic 분포에 제1적합하고 Normal 분포에 제2적합하는 것으로 나타났으며, 또한 가동 중에는 Extreme value 분포에 제1적합하고, Normal 분포에 제3적합하는 것으로 나타나 실내공기 중 NO₂의 농도분포는 대략적으로 정규분포하고 있는 것으로 조사되었다.

Table 3은 PM10과 NO₂의 공기청정기 가동 전·후

Table 2. Types of statistical distribution of PM10 and NO₂ concentration

	Type of distribution	Parameter	Goodness-of-fit test				
			x ²	p-value	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling	
PM-10 (µg/m ³)	Off	Extreme value	12.97 ^{a)} , 8.14 ^{b)}	5.786	0.565	0.086	0.424
		Gamma	0.00 ^{c)} , 9.00 ^{b)} , 1.99 ^{d)}	8.286	0.218	0.138	1.479
		Logistic	16.32 ^{e)} , 6.10 ^{b)}	10.071	0.185	0.110	1.006
	On	Lognormal	15.30 ^{e)} , 12.54 ^{d)}	1.615	0.978	0.077	0.216
		Weibull	2.78 ^{e)} , 12.62 ^{b)} , 1.02 ^{d)}	3.154	0.789	0.076	0.318
		Gamma	2.99, 13.41, 0.92	4.077	0.666	0.087	0.523
NO ₂ (ppb)	Off	Logistic	6.62, 0.79	6.710	0.460	0.083	0.572
		Normal	6.58 ^{e)} , 1.43 ^{d)}	7.032	0.426	0.091	0.612
		Weibull	0.44, 6.69, 4.92	7.032	0.318	0.094	0.619
	On	Extreme value	3.69, 1.60	5.066	0.652	0.125	0.921
		Gamma	0.34, 0.89, 4.77	4.738	0.578	0.122	0.872
		Normal	4.59, 1.85	7.033	0.426	0.108	1.092

^{a)}Mode, ^{b)}Scale, ^{c)}Location, ^{d)}Shape, ^{e)}Mean, ^{f)}Standard deviation

Table 3. Average concentration and difference of PM10 and NO₂ in indoor air during operating period and non-operating period

		Number of sample	Mean	Standard deviation	Minimum	Maximum	p-value
PM10 (µg/m ³)	Off	56	13.66 ^{a)}	2.55 ^{b)}	0.27	95.86	0.001
	On	65	11.83 ^{a)}	2.06 ^{b)}	2.99	71.78	
NO ₂ (ppb)	Off	61	6.58	1.43	3.10	11.83	0.001
	On	62	4.59	1.85	1.45	7.77	

^{a)}Mode, ^{b)}Scale, ^{c)}Location, ^{d)}Shape, ^{e)}Mean, ^{f)}Standard deviation

의 실내공기중의 평균농도 및 차이를 검정한 결과이다. 이때 NO₂의 실내공기중 농도분포는 정규분포화 하고 있는 것으로 조사되어 실측값을 이용하여 검정하였으며, PM10의 경우 꼬리가 오른쪽으로 치우친 농도분포를 보이고 있어 log 변환을 통해 정규분포화 시킨 후 검정을 실시하였다. PM10의 경우 공기청정기 가동 전과 가동 중의 기하평균농도는 각각 13.66±2.55 µg/m³, 11.83±2.06 µg/m³로 통계적으로 유의한 차이를 나타냈으며(p=0.001), NO₂ 역시 가동 전과 가동 중의 산술평균농도는 각각 6.58±1.43 ppb, 4.59±1.85 ppb로 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다(p=0.001).

3. 거주환경에 따른 공기청정기 가동 전·중의 오염물질 농도분포 조사

Fig. 2는 거주환경 특성에 따른 PM10의 공기청정기 가동 전·중의 농도분포를 나타낸 것이다. 거주자의 수에 따른 실내공기중 PM10의 공기청정기 가동 전·중의 기하평균농도는 3명 이하일 경우 각각 11.48±3.16 µg/m³, 10.00±1.95 µg/m³로 가동 중이 가동 전에 비해 1.48±3.2 µg/m³ 만큼 감소하였으며, 4명일 경우는 각각 14.13±2.75 µg/m³, 14.13±2.29 µg/m³으로 큰 차

이를 나타내지 않았다. 거주자가 5명 이상일 경우는 각각 16.60±1.55 µg/m³, 14.45±2.09 µg/m³으로 2.15±1.95 µg/m³ 만큼 감소한 것으로 조사되었다. 또한 거주자의 수가 증가할수록 실내공기중의 PM10의 농도가 증가하는 것으로 조사되었다.

실내 흡연자의 유무에 따른 공기청정기 가동 전·중의 PM10의 기하평균농도는 흡연자가 있는 실내의 경우 각각 15.13±2.57 µg/m³, 12.02±2.19 µg/m³로 3.11±2.88 µg/m³ 만큼 감소한 것으로 조사되었으며, 흡연자가 없는 실내의 경우 각각 12.02±2.63 µg/m³, 12.02±2.09 µg/m³로 큰 차이를 나타내지 않았다.

실내에서 애완동물을 기르고 있는 거주지의 공기청정기 가동 전·중의 실내공기중 PM10의 기하평균농도는 각각 20.41±1.55 µg/m³, 11.22±2.40 µg/m³으로 9.19±2.69 µg/m³ 만큼 감소한 것으로 조사되었으며, 애완동물을 기르지 않은 거주지에서는 각각 12.59±2.69 µg/m³, 12.30±2.10 µg/m³으로 0.29±3.02 µg/m³ 만큼 감소한 것으로 조사되었다.

Fig. 3은 공기청정기 가동 전·중의 주거환경 특성에 따른 공기중 NO₂의 농도분포를 나타낸 것이다. 거주자의 수에 따른 공기청정기 가동 전·중의 NO₂의 평균

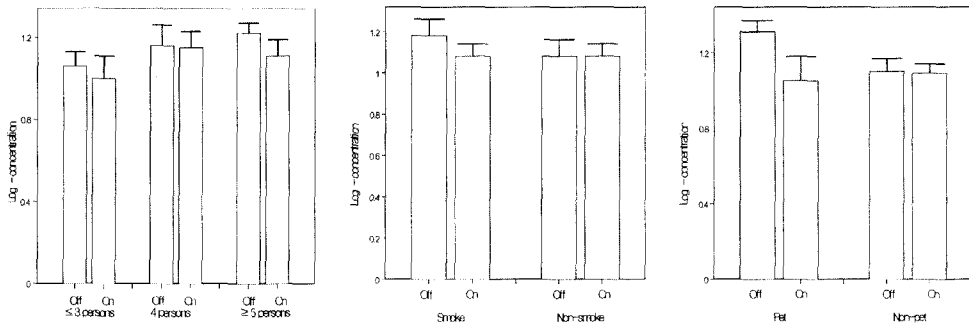


Fig. 2. Distribution of concentration for PM10 during operating air cleaner and non-operating the air cleaner.

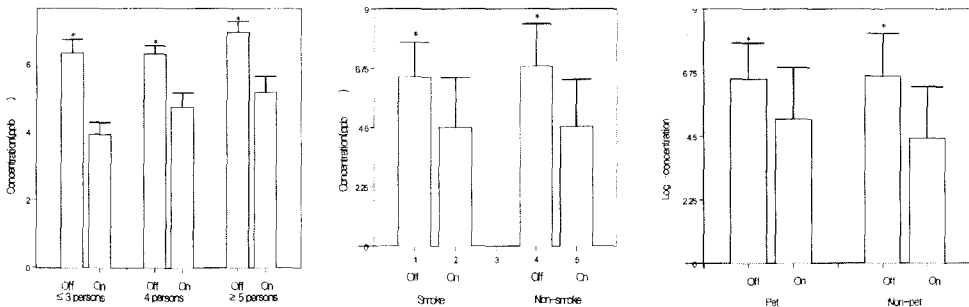


Fig. 3. Distribution of concentration for NO₂ during operating air cleaner and non-operating the air cleaner.

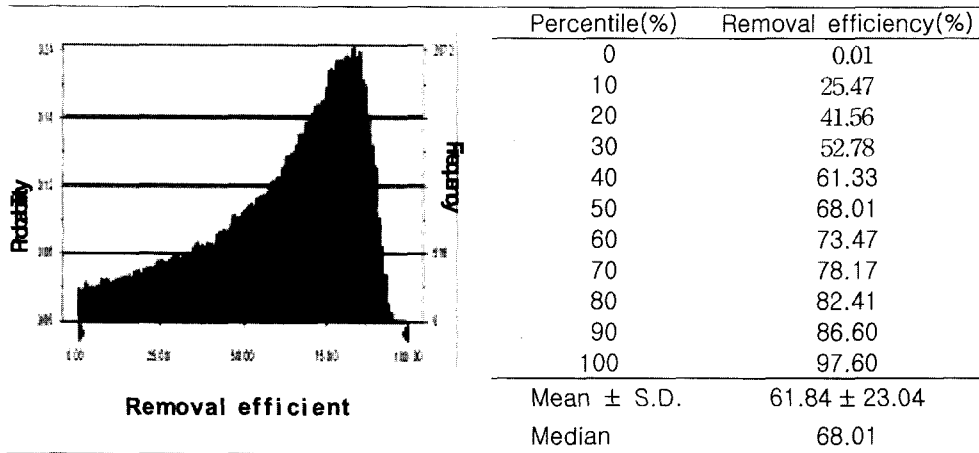


Fig. 4. Efficiency of removal for PM10 by using Monte-Carlo simulation.

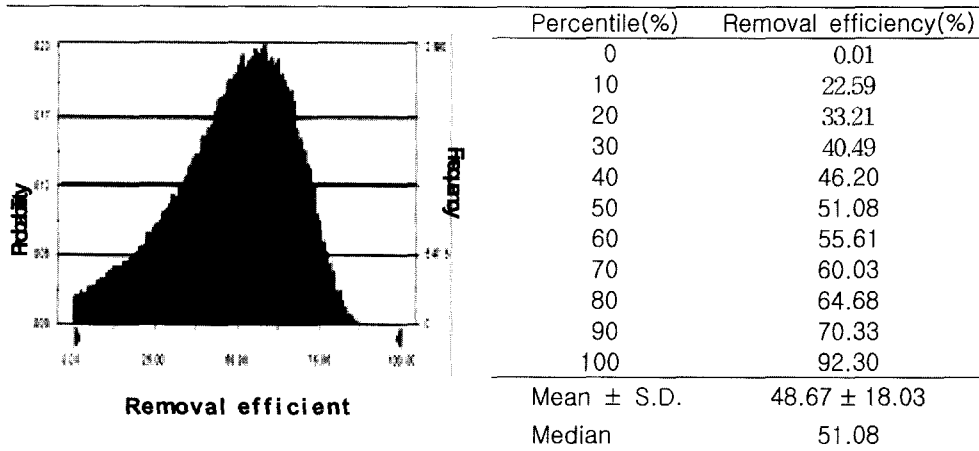


Fig. 5. Efficiency of removal for NO₂ by using Monte-Carlo simulation.

농도는 거주자의 수가 3명 이하일 때 각각 6.66 ± 1.86 ppb, 3.93 ± 1.69 ppb로 2.74 ± 2.23 ppb의 차이를 나타냈다. 거주자의 수가 4명일 때의 평균농도는 각각 6.31 ± 1.13 ppb, 4.74 ± 1.92 ppb로 1.57 ± 1.74 ppb의 차이를 나타냈다. 거주자의 수가 5명 이상일 때의 평균농도는 6.96 ± 1.16 ppb, 5.17 ± 1.74 ppb로 1.79 ± 2.17 ppb의 차이를 나타냈다.

흡연자의 유무에 따른 공기청정기 가동 전·중의 실내공기중의 NO₂의 평균농도는 흡연자가 거주하는 거주지에서 각각 6.41 ± 1.32 ppb, 4.50 ± 1.90 ppb로 1.91 ± 2.00 ppb의 차이를 나타냈으며, 흡연자가 거주하지 않는 거주지에서 또한 각각 6.82 ± 1.61 ppb, 4.54 ± 1.79 ppb로 2.28 ± 2.19 ppb의 차이를 나타냈다.

애완동물이 있는 거주지와 없는 거주지의 비교에서

애완동물이 거주하는 거주지 실내공기중 NO₂의 평균농도는 공기청정기 가동 전·중 각각 6.51 ± 1.27 ppb, 5.09 ± 1.83 ppb로 1.42 ± 1.61 ppb의 차이를 나타냈으며, 애완동물이 거주하지 않는 거주지의 NO₂의 평균농도는 각각 6.61 ± 1.51 ppb, 4.41 ± 1.83 ppb로 2.21 ± 2.15 ppb의 차이를 나타냈다.

4. 공기청정기 제거효율

Fig. 4는 공기청정기의 PM10에 대한 제거효율에 몬테카를로 모의실험 100,000번을 행한 결과로서 평균제거효율은 $61.84 \pm 23.04\%$ 로 왼쪽으로 긴 꼬리를 가진 비정규분포를 나타냈으며, 중앙값은 68.01%였다. PM10에 대한 공기청정기의 제거효율분포는 70%에서 90%까지 높은 빈도수를 나타냈으며, 가장 높은 빈도수를

나타낸 제거효율은 84%인 것으로 조사되었다.

Fig. 5는 NO₂의 제거효율에 대한 100,000번의 몬테카를로 모의실험 결과로 평균제거효율은 48.67±18.03%로 왼쪽으로 긴 꼬리를 가진 비정규분포를 나타냈으며, 중앙값은 51.08%였다. NO₂에 대한 공기청정기의 제거효율분포는 50%에서 70%까지 높은 빈도수를 나타냈으며, 가장 높은 빈도수를 나타낸 제거효율은 63%로 조사되었다.

IV. 고 찰

본 연구는 과거 챔버실험을 통한 공기청정기의 제거효율을 평가한 연구와는 달리 실생활에서의 공기청정기의 실내공기오염물질에 대한 제거효율을 평가한 연구로서 주거건물을 대상으로 공기청정기 가동 전과 가동 중의 입자상오염물질인 PM₁₀과 가스상오염물질인 NO₂를 대상으로 공기청정기의 제거효율을 평가하였다. 공기청정기 가동 전·중의 오염물질의 농도차이를 검증함으로써 공기청정기의 가동에 따른 실내공기질 개선 여부를 조사하기 위해 PM₁₀과 NO₂의 실내 농도분포를 조사하고 이들 농도분포를 변수변환을 통해 정규분포화하여 짝비교(paired t-test) 및 일원분산분석(one-way ANOVA)을 실시한 결과 PM₁₀ 및 NO₂의 공기청정기 가동전의 농도와 가동중의 농도간에 통계적으로 유의한 차이(모두 p<0.001)를 나타냈다. 이는 공기청정기의 가동이 실내공기중의 PM₁₀ 및 NO₂의 농도를 저감시켰음을 나타내는 결과라 사료된다.

또한 주거환경의 차이에서 오는 혼란적 요소를 제어하기 위해 설문조사를 통해 조사대상자의 일반적 특성과 주거환경의 물리적 특성 및 거주환경 특성을 파악하고 이들 환경적 요소에 따른 PM₁₀과 NO₂의 공기청정기 가동 전·중의 농도차를 평가한 결과 PM₁₀의 경우 거주자수, 거주자 중 흡연자의 유무 및 실내 애완동물의 유무에 따른 공기청정기 가동 전에 비해 공기청정기 가동 중의 농도가 감소한 것으로 조사되었으며, NO₂ 또한 공기청정기 가동 전에 비해 가동 중의 농도가 크게 감소하는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 각 환경조건에 따른 농도자료의 부족으로 각 조건의 PM₁₀ 및 NO₂의 농도 분포를 조사할 수 없어 통계적 검증을 실시하지 못하여 측정된 자료의 농도 분포도를 통해 공기청정기 가동 전과 가동 중의 농도 차를 조사하였다. 향후 장기간의 자료 축적을 통한 주거환경 및 거주환경 특성에 따른 공기청정기 가동 전과 가동 후의 농도분포 조사 및 통계적 검증이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

챔버실험과 달리 환경요소가 제어되지 않은 실생활공간에서의 공기청정기 제거효율 산출에 있어 발생하는 불확실성을 제어하기 위해 몬테카를로 모의실험을 실시하여 제거효율의 분포를 추정된 결과 공기청정기의 PM₁₀ 및 NO₂의 제거효율분포 중 가장 높은 빈도수를 나타낸 제거효율은 각각 84%, 63%로 조사되었으며, 또한 PM₁₀ 및 NO₂의 제거효율분포가 모두 왼쪽으로 긴 꼬리를 가진 비정규분포로서 높은 제거효율에서 높은 빈도수를 나타내고 있는 결과를 나타냈다. 이는 환경요소가 제어된 챔버에서의 실험에서와 같이 환경요소가 제어되지 않은 실생활에서 또한 공기청정기의 PM₁₀ 및 NO₂의 제거율이 높음을 나타내는 결과라 할 수 있다.

또한 연구기간중 측정대상 가정의 실내공간의 부피(m³)와 측정당시 외기농도가 비교측정되었다면 외기의 배경농도가 실내공기에 기여도 산출할 수 있었지만 그 부분의 연구가 이루어지지 못하였다. 향후 관련 연구에서는 이 부분에 대한 충분한 측정·분석이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 연구는 2003년 4월부터 9월까지 5개월간 서울시 및 경기도 지역에 위치한 주택 34곳을 무작위로 선정하여 공기청정기 가동 전과 가동 중의 실내 공기 중의 PM₁₀의 농도 및 NO₂의 농도를 각 2회씩 조사하고 이들 농도자료의 통계적 분석 및 몬테카를로 모의실험을 통해 실생활에서의 공기청정기 가동에 따른 실내공기질 개선 여부를 조사한 결과 공기청정기 가동 전과 가동 중일 때 PM₁₀의 평균농도는 각각 13.66±2.55 µg/m³, 11.83±2.06 µg/m³, NO₂의 평균농도는 각각 6.58±1.43 ppb, 4.59±1.85 ppb로 모두 통계적으로 유의한 차이를 보임으로써 공기청정기가 실내공기중의 PM₁₀ 및 NO₂의 농도 저감에 기여한 결과를 나타냈으며, 또한 공기청정기의 오염물질 제거효율을 몬테카를로 모의실험을 통해 산출한 결과 PM₁₀ 및 NO₂의 제거효율이 각각 84%, 63%에서 가장 높은 빈도수를 나타냈다. 이러한 결과를 종합하여 볼 때 실내공기질 개선 방안이 있어 공기청정기를 이용한 실내공기질 개선 방안은 적절하다 할 수 있다. 그러나 공기청정기를 이용한 실내공기질 개선에 있어 선행되어야 할 것은 국내 공기청정기 업체들이 현재 나와있는 규격 기준에 의한 우수한 제품을 개발하여, 적정가격수준인 값싸고 효율이 우수한 공기청정기의 공급이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. Vincent, D., Annesi, I., Festy, B. and Lambrozo, J. : Ventilation system, indoor air quality, and health outcomes in parisian modern office workers. *Environmental Research*, **75**, 100-112, 1997.
2. 김신도 : 건축자재에서의 VOCs 방출량 측정. 2000년 실내 VOCs 토론회, pp.4, 2000.
3. 국립환경연구원 환경기술진흥센터 : 환경기술연구개발. 행정간행물, 제21호, pp.13, 2001
4. 환경부 : 환경백서 2000, pp.125-127, 2001.
5. ASHRAE : Air Cleaners for Particulate Contaminants, ASHRAE Handbook, Ch, 1996.
6. Japan Standard Association : JIS C 9615, Air Cleaners, 1995.
7. 한국산업규격 : KS C 9314, 공기청정기, 1994.
8. Lee, K., Yanagisawa, Y., Spengler, J. D. and Billick, I. H. : Wind velocity effects of sampling rate of NO₂ badge. *J. Expos. Anal. Environ. Epi.*, **2**, 207-219, 2001.
9. 박민하, 김용표, 강창희 : 황사/비황사의 입자 조성 변화 : 1992-1996 봄철 고산 측정자료. 한국대기환경학회지, **17**, 487-492, 2001.
10. 유경훈 : 공기청정기 시험법의 특성과 동향. 공기청정기술, **11**(2), 40-49, 1998.
11. Copeland, T. L., Paustenbach, D. J., Harris, M. A. and Otani, J. : Comparing the results of a monte carlo analysis with EPA's reasonable maximum exposed individual(RMEI); A case study of a former wood treatment site. *Regul. Toxicol. Pharmacol.*, **18**, 275-312, 1993.