

습식 공기청정장치의 공기오염물질 제거 특성

배귀남 · 김용표 · 백남준*

한국과학기술연구원 지구환경연구센터
*삼성엔지니어링(주) 기술연구소

(1999년 3월 16일 접수, 1999년 9월 17일 채택)

Characteristics of a Wet Air Cleaning System for Removal of Air Pollutants

Gwi-Nam Bae · Yong Pyo Kim · Nam Jun Baik*

*Global Environmental Research Center, Korea Institute of Science and Technology
R&D Center, Samsung Engineering Co., Ltd.

ABSTRACT

Performance characteristics of a wet air cleaning system were investigated experimentally, and discussed in relation with physicochemical properties of the target pollutants. The system is composed of an air cleaner, a separator, and a medium filter. Removal efficiency of the system was measured for ambient particles and gaseous air pollutants: SO₂, NO, NO₂, HCHO, and NH₃. For particle removal test, particles were introduced into the system through a fan, and the particle size distribution was measured at three locations by using two laser particle counters. Particle removal efficiency for each system component was obtained from the particle size distribution. It was found that the separator primarily removed coarse particles greater than 5 μm in diameter, and that the medium filter mainly removed fine particles less than 5 μm in diameter. For gas removal test, air with gaseous air pollutant was injected into the outlet of the fan, and the concentration was measured both at the upstream of the air cleaner and at the downstream of the separator. It was found that the gaseous species with high Henry's law coefficients, such as SO₂, HCHO, and NH₃, showed high removal efficiency, but the gaseous species with low Henry's law coefficients, such as NO and NO₂, showed low removal efficiencies. It was also found that negative ions were generated from the air cleaner.

Key Words : Air Pollutants, Particles, Particle Size, Hazardous Gas, Negative Ions, Removal Efficiency

요 약 문

본 연구에서는 공기청정기, 기수분리기 및 중성능 필터로 구성되는 습식 공기청정장치를 대상으로 입자와 유해가스인 SO₂, NO, NO₂, HCHO 및 NH₃의 제거 특성을 실험적으로 살펴보고, 실험결과를 대상물질의 물리화학적 특성과 연관시켜 검토하였다. 입자제거 실험에서는 대기 에어로졸을 송풍기를 통해 장치에 도입하여 장치의 3곳에서 2대의 레이저 입자계수기로 입자크기 분포를 측정하여 각 구성요소의 입자제거효율을 구하였다. 실험결과로부터 기수분리기에서는 입경이 5 μm 이상인 조대 입자가 주로 제거되고, 중성능 필터에서는 이보다 작은 미세 입자가 주로 제거됨을 알 수 있었다. 유해가스 제거 실험에서는 시험용 가스를 송풍기의 출구에 주입하여 공기청정기의 상류와 기수분리기의 하류에서 가스농도를 측정하여 유해가스 제거효율을 구하였다. 실험결과로부터 헨리상수가 큰 수용성인 SO₂, HCHO 및 NH₃는 제거효율이 높았으나, 헨리상수가 낮아 난용성인 NO와 NO₂는 제거효율이 낮음을 알 수 있었으며, 공기청정기에서 상당량의 음이온이 발생됨을 알았다.

주제어 : 공기오염물질, 입자, 입경, 유해가스, 음이온, 제거효율

1. 서 론

대기오염의 심화, 건물의 밀폐화 등으로 인해 실내 공기오염이 피부로 느껴지는 수준에 이르러, 국내외적으로 실내 공기질(indoor air quality)에 대한 관심이 높아지고 있다. 실내 공기오염은 주로 대기오염물질의 실내유입, 실내 오염발생원, 실내 환기량의 부족 등으로 인해 생긴다. 실내 공기오염물질은 크게 입자상 물질, 가스상 물질, 그리고 복합오염물질로 구분된다. 입자상 물질로는 에어로졸, 석면, 라돈, 납해중, 미생물 등이 있고, 가스상 물질로는 이산화탄소, 일산화탄소, 질소산화물, 황산화물, 포름알데히드, 오존 등이 있다. 그리고, 담배 연기, 냄새, 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds), 건물 증후군(sick building syndrome) 등이 복합 오염물질에 속한다.

외국에서는 1970년대 초부터 실내 공기질에 대한 연구가 시작되었고, 국내에서는 1990년대를 전후하여 사무실, 주택, 지하상가, 백화점 등과 같은 다양한 실내공간을 대상으로 공기오염도를 조사하는 연구가 시작되었다. 실내 공기오염 문제를 해결하기 위해서는 오염원 규명 및 제어, 오염물질 제어, 오염물질 측정 및 평가, 공기청정장치 개발, 위해성 평가 등과 같은 다양한 측면에서 연구가 수행되어야 한다. 그런데, 실내 공기질에 관한 지금까지의 국내 연

구는 실내 공기오염도 수준을 파악하기 위한 오염물질의 측정 및 평가가 대부분을 차지하고 있는 실정이다.^{1,2)}

최근 실내 공기질을 개선하기 위하여 입자나 유해가스, 냄새 등을 제거하는 다양한 기능의 공기청정기(공기정화기)가 공공건물, 병원, 사무실, 주택 등에서 널리 사용되고 있다. 주로 필터 여지를 이용하는 기계식과 정전기 현상을 이용하는 전기식 공기청정기가 시판되어 왔으나, 최근에는 물을 사용하는 습식 공기청정기도 개발되어 판매되고 있다.³⁾ 국내에도 공기청정기의 성능평가에 관한 한국산업규격(KS C 9314-1994)이 있지만,⁴⁾ 공기청정기의 성능이 기술적으로 입증되지 않은 상태에서 공기청정기가 시판되고 있어 문제점으로 지적되고 있다. KS C 9314에는 기계식과 전기식 공기청정기를 대상으로 입자와 유해가스(아황산가스, 이산화질소)의 성능시험방법이 규정되어 있다. 그러나, 습식 공기청정기의 성능시험방법에 대한 규격은 아직 없는 실정이다.

공기청정장치의 입자제거 성능시험방법으로 지금까지는 중량법, 비색법(입자 반점법) 등이 주로 사용되어 왔다. 미국의 ASHRAE Standard 52-76은 중량법과 비색법을 규정하여 두가지 결과를 모두 보고하도록 규정하고 있고,⁵⁾ 국내의 경우 KS C 9314에 비색법이 규정되어 있다. 그런데, 인체에 유해한 입자는 조대 입자보다 공기 중에 잘 부유하는 미세

입자인 것으로 알려짐에 따라 입자크기분포에 대한 정보도 중요하게 고려되고 있다. 현재 미국에서는 환기용 공기청정장치의 입자제거 성능시험법으로 입자크기별 효율을 나타내는 계수법을 규정하려고 작업중이며,⁶⁾ 국내의 한국공기청정협회에서도 공기청정기에 관한 단체표준규격(안)을 만들었는데 여기에서도 계수법으로 공기청정기의 입자제거성능을 평가하려고 한다.⁷⁾

현재 공기청정기가 많이 시판되고 있으나, 공기청정기에 대한 국내의 연구는 매우 드물다. 즉, 오명도 등^{8,9)}의 2단 평행판 정전식 집진기에 대한 연구와 최석호와 안강호¹⁰⁾의 공기청정기 효율 평가방법에 관한 연구가 있는 정도이고, 이러한 연구도 입자에 대한 경우이다. 그러므로, 공기청정장치를 사용하여 실내 공기질을 개선하기 위해서는 입자뿐만 아니라 유해가스를 포함하는 다양한 오염물질에 대한 공기청정장치의 성능 특성에 관한 연구가 많이 수행되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 공기조화장치로 사용되는 습식 공기청정장치의 오염물질 제거 특성을 살펴보기 위하여 정격풍량이 12 m³/min인 수평형 습식 공기청정장치를 대상으로 입자 및 유해가스의 제거 특성과 음이온 발생량에 대한 실험을 수행하였다. 입자 실험은 대기 에어로졸을 사용하여 습식 공기청정장치의 구성 요소인 공기청정기, 기수분리기 및 중성능 필터의 입구와 출구에서 입자계수기로 입자크기별 농도를 측정하여 각 구성 요소의 입자제거 특성을 파악하였다. 유해가스 실험은 대표적 유해가스인 아황산가스(SO₂), 질소산화물(NO_x), 포름알데히드(HCHO), 암모니아(NH₃)를 대상으로 입구와 출구에서의 농도를 측정하여 유해가스 제거 특성을 살펴보고 실험결과를 검토하였다. 또한, 음이온이 인체에 좋은 영향을 미친다고 알려져 있으므로, 습식 공기청정장치의 음이온 발생량도 측정하였다.

2. 실험

2.1. 입자 및 음이온

Fig. 1에 나타난 바와 같이 습식 공기청정장치는

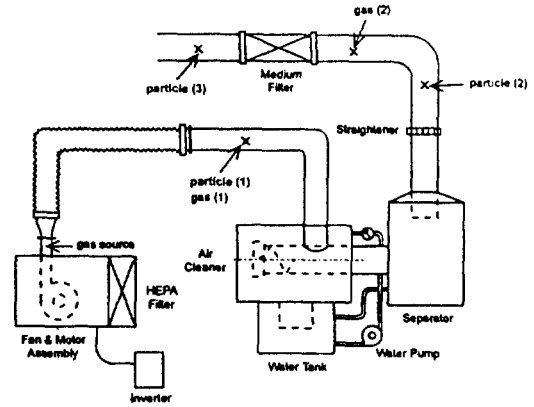


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental wet air cleaning system.

기본적으로 송풍기, 물펌프, 공기청정기(air cleaner), 기수분리기(separator)로 구성되고, 기수분리기 하류에 미스트(mist) 필터(중성능 필터 또는 고성능 필터)를 설치하여 사용하고 있다. 본 실험에서는 인버터를 사용하여 송풍기의 풍량을 조절하였다. 공기청정기 상류 측의 특성을 측정하기 위하여 아크릴 파이프를 길게 연결하고, 송풍기 출구와 아크릴 파이프는 플렉시블 덕트로 연결하였으며, 기류분포를 균일하게 만들어 주기 위하여 플렉시블 덕트 연결 부위에 여러 장의 철망을 설치하였다. 또한, 기수분리기 하류의 기류는 교란이 매우 심하므로, 기류를 균일하게 만들어 주기 위하여 기류정류기(flow straightener)를 아크릴로 제작하여 기수분리기 하류에 설치하였다.^{11,12)}

입자 및 유해가스 측정단면의 기류분포를 살펴보기 위하여 풍속계(VelociCalc., TSI Model 8350)를 사용하여 아크릴 파이프 내 동일 단면에서 5곳의 풍속을 측정하였으며, 풍량은 이들 풍속을 평균하여 산출하였다. 풍속분포는 동일 단면에서 평균 풍속의 ±10% 이내로 균일하였다.¹¹⁾ 모든 실험은 기본적으로 분무 노즐로 공급되는 물의 수압이 1.2 kg/cm², 물의 순환량이 52 L/min인 조건에서 수행하였다.

본 연구에서는 대기 에어로졸이 측정대상이므로, 0.1 μm 이상의 입자를 측정하는데 많이 사용되는 2대의 레이저 입자계수기(Laser Particle Counter)를 사용하였다. 하나는 샘플유량이 0.1 ft³/min이고, 0.5 μm 이상의 입자를 2채널(0.5, 5 μm)로 분

류하여 측정하는 레이저 입자계수기(TSI Model 3755)이다. 이 경우 별도의 데이터 처리장치(Remote Processor, TSI Model 3703)와 연결하여 측정값을 보고, 외장형 프린터로 결과를 출력하였다. 다른 하나는 샘플유량이 $1 \text{ ft}^3/\text{min}$ 이고, $0.09 \mu\text{m}$ 이상의 입자를 6채널($0.09, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0 \mu\text{m}$)로 분류하여 측정하는 레이저 입자계수기(Hiac/Royco Model 5109)이다.

습식 공기청정장치의 정격풍량이 크므로 시험입자로는 대기 에어로졸을 사용하였다. TSI 입자계수기는 $0.5 \mu\text{m}$ 이상의 입자를 측정하지만, Hiac/Royco 입자계수기는 보다 작은 $0.09 \mu\text{m}$ 이상의 입자를 측정하므로 대기 에어로졸의 농도를 낮추기 위하여 송풍기 흡입구에 고성능(HEPA, High Efficiency Particulate Air) 필터를 설치하여 실험을 수행하였다. 입자를 측정하기 위하여 샘플링 관을 입구(1 : 공기청정기의 상류), 중간(2 : 기수분리기의 하류), 출구(3 : 중성능 필터의 하류)의 기류분포 측정단면의 중앙에 설치하고, 입자에 함유된 습기를 제거하기 위하여 샘플링 관과 입자계수기 사이에 연결된 동관을 가열하였다. 이 때 동속흡인이 되도록 샘플링 관의 내경을 선정하였다. 입자는 입구, 중간, 출구 순으로 각 위치에서 1분씩 3번 측정 후 평균을 취하여 대표값으로 사용하였다.

한편, 이온계수기(Ion Counter, Dan Science Model 83-1001B)를 사용하여 습식 공기청정장치로부터 발생되는 음이온을 측정하였다. 이 이온계수기는 $0.001 \mu\text{m}$ 정도의 작은 이온(음이온과 양이온)을 측정하는데, 샘플유량은 $100 \text{ L}/\text{min}$ 이고, 측정범위는 $10 \sim 10^6$ 개/ cm^3 이다. 기록계(Pen Recorder, Panasonic Model VP-6712A)를 사용하여 측정결과를 출력하였으며, 몇 분간 측정된 값의 중간값을 대표값으로 사용하였다. 본 실험에서는 이동도(mobility)를 $1 \text{ v} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 로 설정하여 이온을 측정하였다. 이온계수기의 센서는 매우 커서 실험장치의 아크릴 파이프 내에 설치하기가 곤란하므로, 센서를 실험장치의 맨 마지막 아크릴 파이프 25 cm 하류에 수직으로 설치하여 음이온과 양이온을 측정하였다.

2.2. 유해가스

유해가스 실험은 대표적 오염물질인 아황산가스,

질소산화물, 포름알데히드, 암모니아를 대상으로 Fig. 1에 나타난 실험장치 중에서 중성능 필터를 설치하지 않은 상태에서 수행하였다. SO_2 , NO_x 및 NH_3 의 경우 기체교정기(Calibrator, Thermo Environmental Instruments, Model 146)를 사용하여 가스 실린더로부터 공급되는 시험용 가스의 유량을 일정하게 하여 송풍기 출구 근처에 위치한 작은 관을 통하여 주입하였다. HCHO는 상온, 대기압에서 액체 상태로 존재하므로, 본 실험에서는 HCHO 용액을 가열판(heating mantle)에 올려놓고 가열하여 발생된 증기를 실험장치 내에 주입하였다.¹¹⁾ 본 실험에서 사용한 가스 측정기기의 감도, 측정 데이터의 신뢰성, 실험시간 등을 감안하여 일반적인 실내 대기 농도보다 높은 농도의 가스를 주입하여 실험을 수행하였다.

유해가스 농도는 습식 공기청정장치의 입구(1 : 공기청정기의 상류)와 중간(2 : 기수분리기의 하류)에 설치된 가스 샘플링 관을 이용하여 측정하였다. SO_2 는 Pulsed Fluorescent Ambient SO_2 Analyzer(Thermo Environmental Instruments, Model 43A)로 측정하였으며, 이 기기의 측정범위는 $0.001 \sim 1 \text{ ppm}$ 이다. NO_x 는 Chemiluminescence $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ Analyzer(Thermo Environmental Instruments, Model 42)로 측정하였으며, 이 기기의 측정범위는 $0.1 \sim 1000 \text{ ppb}$ 이다. HCHO와 NH_3 는 흡수관(impinger)을 사용하여 채취한 후, HCHO는 아세틸 아세톤법으로 NH_3 는 인도 페놀법으로 각각의 농도를 측정하였다.^{11) 13)}

3. 결과 및 고찰

3.1. 입자제거 특성

습식 공기청정장치의 입자제거 특성 실험은 핵심 구성요소인 공기청정기, 기수분리기 및 중성능 필터의 각 특성을 규명할 수 있도록 수행하였다.

기수분리기는 공기청정기 내에서 노즐 분무에 의해 생성되는 액적을 원심력을 이용하여 공기와 분리시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 기수분리기의 특성을 파악하기 위하여 공기청정기를 가동시키지

않은 상태에서 입구와 중간(기수분리기의 출구)에서 입자를 측정하였다. 일반적으로 싸이클론의 경우 조대 입자(수 μm 이상의 입자)에 대한 제거효율이 미세 입자에 비해 높으며, 풍량(풍속)이 증가함에 따라 입자에 작용하는 원심력이 증가하여 입자가 기류로부터 보다 잘 분리되어 입자제거효율이 증가하는 것으로 알려져 있다.^{12,14,15)} 입자제거효율이 50% 되는 입경을 분리입경(cut size)이라고 부르며, 싸이클론의 성능을 나타내는 대표적인 변수로 사용된다. 기수분리기의 구조 및 형상이 싸이클론과 유사하므로, 기수분리기의 성능특성은 일반적인 싸이클론의 성능특성과 유사할 것으로 예상된다.

TSI 입자계수기로 입자를 측정된 결과에 의하면, 입경이 $0.5 \mu\text{m}$ 이상인 경우 입구와 중간의 입자농도가 거의 비슷하다. 이것은 싸이클론의 경우 이러한 미세 입자를 제거하지 못하기 때문이다. 이때 입구농도는 $8\sim 33 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 범위이었다. 반면에, 풍량에 따른 입자제거효율을 나타낸 Fig. 2(Air Cleaner OFF인 경우)를 보면, 동일 풍량에서 입자제거효율의 편차는 크지만 풍량이 증가할수록 입자제거효율이 높아지는 경향이 있고, 입경(D_p)이 $5 \mu\text{m}$ 이상인 조대 입자는 상당히 제거됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 기수분리기가 싸이클론의 성능특성을 나타내고 있는 것을 의미한다. 특히, 습식 공기청정장치의 정격풍량($12 \text{ m}^3/\text{min}$)에 가까운 풍량($9.47 \text{ m}^3/\text{min}$)일 때의 입자제거효율은 모두 50% 이상으로 높다. 이러한 실험결과로부터 습식 공기청정장치의 정격풍량에서는 입경이 $5 \mu\text{m}$ 이상인 조대 입자의 제거효율이 50% 이상 될 것이고, 기수분리기의 분리입경은 $5 \mu\text{m}$ 이하일 것으로 추정된다. 따라서, 습식 공기청정장치의 구성요소인 기수분리기의 성능을 예측하고, 최적 운전조건을 결정하기 위해서는 일반적인 싸이클론의 성능특성을 이용하면 될 것으로 사료된다.

공기청정기는 일종의 습식 스크러버로 많은 노즐(본 실험장치의 경우 24개)을 통해 물을 분무시켜 공기가 지나가는 통로에 액적으로 된 수막을 형성함으로써 공기 중에 포함된 입자 및 유해가스를 제거하는 역할을 한다.¹⁴⁾ 공기청정기의 특성을 파악하기 위하여 공기청정기를 가동시킨 상태에서 입구와 중간에서 입자를 측정하였다.

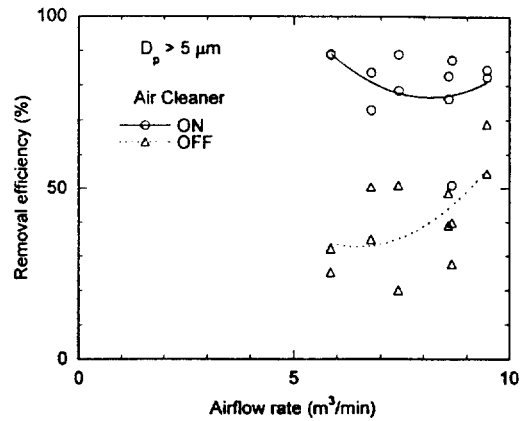


Fig. 2. Particle removal efficiency of the separator with the airflow rate (TSI laser particle counter).

TSI 입자계수기로 조대 입자를 측정된 결과를 나타낸 Fig. 2(Air Cleaner ON인 경우)를 보면, 공기청정기를 가동시키면 풍량에 무관하게 입경이 $5 \mu\text{m}$ 이상인 입자가 보다 잘 제거되어 입자제거효율이 70~90% 정도로 향상됨을 알 수 있다. 공기청정기의 입자제거성능은 분무노즐 특성, 수압, 물/공기의 비율 등에 의해 좌우되는데, 풍량이 증가하게 되면 물/공기의 비율이 낮아지고 공기가 상대적으로 빠르게 수막을 통과하므로, 수막과 공기와의 접촉율이 낮아져 입자제거성능이 나빠지게 된다. 기수분리기의 경우 입경이 클수록 원심력이 증가하여 입자제거효율이 높아지는 특성이 있다.

공기청정기를 가동시킨 경우 입자제거 매커니즘을 살펴보면, 공기에 포함된 대부분의 조대 입자가 공기청정기를 통과할 때 미세 액적으로 만들어진 수막에 부딪혀 직접 공기청정기에서 제거되기도 하고, 여기에서 제거되지 않은 조대 입자는 분무된 미세 액적과의 충돌에 의해 입경이 커져 기수분리기에서 보다 잘 제거된다. 입자제거 매커니즘과 Fig. 2에 나타낸 실험결과를 보면, 조대 입자는 풍량이 적을수록 공기청정기에서 주로 제거되고 풍량이 많을수록 기수분리기에서 주로 제거되며, 중간 풍량에서는 공기청정기와 기수분리기에서 서로 비슷하게 조대 입자가 제거된다고 생각된다. 즉, 풍량의 적을수록 공기청정기의 역할이 커지고, 풍량이 많을수록 기수분리기의 역할이 증가하여 입자제거효율은 풍량에

거의 무관한 실험결과를 나타낸다고 사료된다. 실험에 사용된 습식 공기청정장치의 정격풍량은 12 m³/min이므로, 정격운전 조건에서 대부분의 조대 입자는 공기청정기에서 분무된 액적과의 충돌에 의해 입경이 커져 기수분리기에서 제거될 것으로 추정된다. 이것이 습식 공기청정장치에서 공기청정기 하류에 기수분리기를 설치하는 이유이다.

반면에, 공기청정기를 가동시키면 입경이 0.5 μm 이상인 미세 입자가 증가하는데, 이러한 미세 입자의 발생농도는 7개/cm³ 정도이었다. 이때 입구농도는 7~22개/cm³ 범위이었다. 순환되는 물 속에 포함된 불순물이나 공기 중 아주 미세한 입자가 핵이 되어 노즐 분무시 미세 입자가 생기는 것으로 사료된다.

중성능 필터는 클린룸 시설에서는 최종 필터의 수명을 연장시키기 위하여 사용되고, 일반 공기조화장치에서는 실내로 입자가 제거된 청정한 공기를 공급하기 위한 최종 필터의 역할을 한다. 필터는 입자의 관성충돌, 브라운 운동에 의한 확산, 차단(interception), 중력침강, 정전기적 인력 등의 메커니즘에 의해 입자를 제거하며, 이러한 메커니즘이 입자 제거에 미치는 영향이 입경에 따라 달라지므로 입자 제거효율도 입경에 따라 달라진다.^{16,17)} 즉, 작은 입자는 확산에 의해 주로 제거되고, 큰 입자는 관성에 의해 주로 제거되며, 입경이 클수록 차단 효과는 증가된다. 일반적으로 필터에서 입자제거효율은 입경이 0.3 μm 근처에서 최소가 되고, 입경이 이보다 작을수록 입자가 잘 확산되므로 입자제거효율이 높아지고, 입경이 이보다 클수록 입자의 관성이 증가하므로 입자제거효율이 높아진다고 알려져 있다. 습식 공기청정장치에서 중성능 필터는 공기청정기 내에서 발생하는 액적 중에서 기수분리기로 제거되지 않는 작은 미스트를 제거하기 위하여 사용되고 있다. 이러한 중성능 필터의 입자제거 특성을 살펴보기 위하여 공기청정기의 가동 여부에 따라 중간(2 : 중성능 필터의 상류)과 출구(3 : 중성능 필터의 하류)에서 입자를 측정하였다.

TSI 입자계수기로 중성능 필터 전후의 입자농도를 측정하였는데, 공기청정기의 가동 여부에 무관하게 입경이 5 μm 이상인 입자는 거의 100% 제거되었다.¹¹⁾ 공기청정기를 가동시키지 않은 경우 입경이 0.5 μm 이상인 입자도 70% 이상 제거되고, 공기청

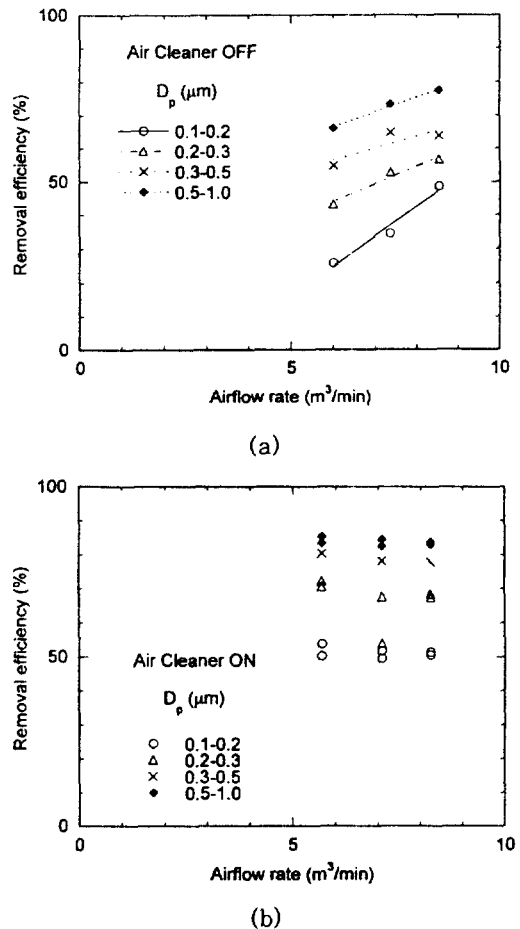


Fig. 3. Particle removal efficiency of the medium filter with the airflow rate (Hiac/Royco laser particle counter).

정기를 가동시키면 입경이 0.5 μm 이상인 입자의 제거효율이 80% 이상으로 향상되었다. 이때 입구농도는 7~15개/cm³ 범위이었다. 입경이 클수록 제거효율이 높은 것은 필터의 일반적 특성을 나타내는 것이며, 공기청정기를 가동시키면 입자가 액적과 충돌하여 입경이 커져 제거효율이 높아지게 된다.

Hiac/Royco 입자계수기로 중성능 필터 전후의 입자농도를 측정된 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 공기청정기를 가동시키지 않은 경우에 대한 측정결과를 나타낸 Fig. 3(a)를 보면, 대체로 풍량이 증가함에 따라 입자제거효율이 높아지며 입경이 클수록 입자가 잘 제거된다. 입경이 0.5 μm 이상인 경우 입자제거효율이 65% 이상으로 TSI 입자계수기로 측정된 결과와 비슷하고, 입경이 0.1 μm 이상인 입자도 25%

이상 제거된다. 본 실험결과에서는 0.3 μm 근처에서 입자제거효율이 최소가 되지 않는데, 이것은 입자의 재질이나 입경 측정방법의 차이에 기인된 것으로 여겨진다. 본 실험에서는 광학적 방법으로 대기 에어로졸의 입경을 측정하였다.

공기청정기를 가동시킨 경우에 대한 측정결과를 나타낸 Fig. 3(b)를 보면, 공기청정기를 가동시키지 않은 경우에 비해 입자제거효율이 향상되는데, 풍량이 적을수록 제거효율이 더 많이 증가되어 풍량에 무관하게 거의 일정한 입자제거효율을 나타낸다. 또한, 입경이 0.5 μm 이상인 경우 입자제거효율이 80% 이상으로 TSI 입자계수기로 측정한 결과와 비슷하고, 입경이 0.1 μm 이상인 입자도 50% 이상 제거된다. 습식 공기청정장치에서 상대습도가 45~60%인 공기가 공기청정기를 지나면 상대습도는 85% 이상으로 증가된다.¹¹⁾ 이와 같이 상대습도가 증가하면 입자 표면의 전하분포가 바뀌어 입자간의 응집이 촉진되며, 결과적으로 입경이 커져 필터에서 입자제거효율이 향상된다.¹⁴⁾

공기청정기, 기수분리기 및 중성능 필터를 포함하는 전체 시스템의 입자제거 특성을 알아보기 위하여 공기청정기의 상류(1)와 중성능 필터의 하류(3)에서 측정된 입자농도로부터 입자제거효율을 구하였다.

TSI 입자계수기로 습식 공기청정장치의 입구와 출구에서 입자농도를 측정하였는데, 공기청정기의 가동 여부에 무관하게 입경이 5 μm 이상인 입자는 거의 100% 제거되었다.¹¹⁾ 공기청정기를 가동시키지 않은 경우 입경이 0.5 μm 이상인 입자도 70% 이상 제거되고, 공기청정기를 가동시키면 앞에서 언급한 바와 같이 공기청정기로부터 미세 입자가 발생하여 입경이 0.5 μm 이상인 입자의 제거효율이 65% 이상으로 약간 낮아짐을 알 수 있다. 이때 입구농도는 7~15개/cm³ 범위이었다.

Hiac/Royco 입자계수기로 습식 공기청정장치의 입구와 출구에서 입자농도를 측정된 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 공기청정기를 가동시킨 경우에 대한 측정결과를 나타낸 Fig. 4를 보면, 풍량에 무관하게 입자제거효율이 일정하며, 입경이 클수록 입자제거효율도 증가함을 알 수 있다. 공기청정기로부터 발생하는 미세 입자로 인해 공기청정기를 가동시키지 않은 경우에 비해 입자제거효율이 약간씩 감소하지만, 입경이 0.5 μm 이상인 입자의 제거효율이 70%

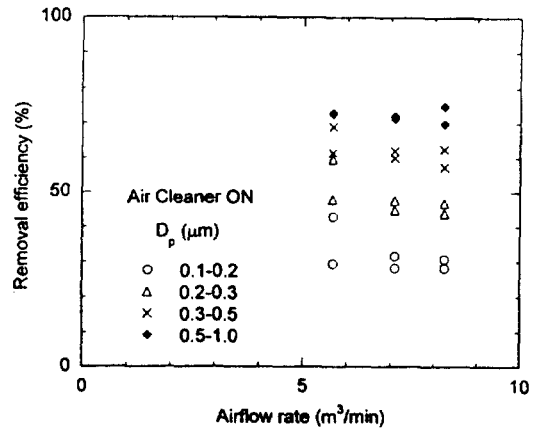


Fig. 4. Particle removal efficiency of the system with the airflow rate (Hiac/Royco laser particle counter).

이상으로 TSI 입자계수기로 측정한 결과와 비슷하다. 또한, 입경이 0.1 μm 이상인 입자도 30% 이상 제거된다. 공기청정기를 가동시키지 않은 경우에 대한 측정결과는 중성능 필터의 경우와 유사하였다.¹¹⁾(Fig. 3(a) 참조)

3.2. 음이온 발생 특성

최근의 문헌에 의하면 음이온에는 입자 제거 효과, 곰팡이 제거 효과, 탈취 및 가스상 물질 제거 효과, 습도 조절 효과, 대전방지 효과가 있는 것으로 알려져 대부분의 공기청정기에는 음이온 발생 기능이 있다.¹¹⁾ 음이온을 인공적으로 만드는 방법으로 코로나 방전을 이용하는 방법이 널리 알려져 있다. 이 방법은 높은 전압을 걸어 코로나 방전을 일으켜서 전극간에 발생하는 다량의 전자에 의해 공기 중의 산소를 음이온으로 만드는 것인데, 부산물로 인체에 유해한 오존과 질소산화물이 발생하는 단점이 있다.

음이온을 발생시키는 다른 방법으로 물의 이온해리를 이용하는 방법이 있다. 비 또는 강수와 관련하여 물이 분열하는 경우 주위의 공기가 전리하는 현상을 Lenard 효과(폭포 효과)라고 한다. 20세기 초반 물리학자인 Lenard는 물방울이 금속판에 충돌하여 분해할 때 주위 공기 중에 이온이 발생한다고 발표하였고, 그 후 Simpson은 이러한 이온이 물방울의 전하에 관계없이 음이온인 것을 실험적으로 밝혀

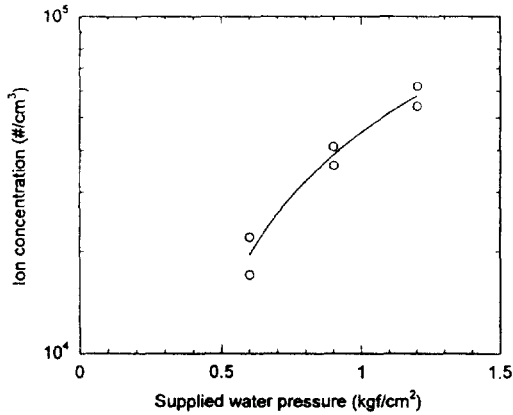


Fig. 5. Concentration of negative ions generated from the air cleaner.

났다.¹¹⁾ 발생하는 음이온의 양은 금속판에 물방울이 충돌하는 에너지와 기체와 액체를 분리시키는 능력에 좌우되는 것으로 알려져 있다.^{11,18)} 이 방법으로 음이온을 발생시키면 유해한 부산물이 생기지 않는 장점이 있다. 습식 공기청정장치의 공기청정기에서 노즐을 통해 물을 분무시키면 Lenard 효과에 의해 음이온이 발생하는 것으로 알려져 있다.¹⁸⁾

본 실험에 앞서 실험장치 주위의 음이온과 양이온을 측정하였는데, 이들 농도는 100~400개/cm³ 정도이었다. 풍량이 변해도 음이온 발생량은 별로 변하지 않으나, Fig. 5에서 보는 바와 같이 분무 노즐로 공급되는 물의 압력이 증가함에 따라 음이온 발생량이 증가함을 알 수 있다. 이것은 물의 압력이 증가하면 충돌 에너지도 증가하기 때문이다. 수압이 1.2 kgf/cm²일 때 공기청정기에서 발생하는 음이온 농도는 60,000개/cm³ 정도이다. 이때 측정된 양이온 농도는 4,000개/cm³ 이하이고 농도변화가 매우 심하게 나타났다.

3.3. 유해가스 제거 특성

본 연구에서는 습식 공기청정장치의 유해가스 제거 특성을 살펴보기 위하여 대표적 유해가스인 이황산가스, 질소산화물, 포름알데히드, 암모니아에 대하여 실험을 수행하였다.

풍량 및 입구농도의 변화에 따른 SO₂ 제거효율 측정결과를 Fig. 6에 나타냈다. 그림을 보면, SO₂의 입구농도를 약 150 ppb로 유지하고 풍량을 변화시

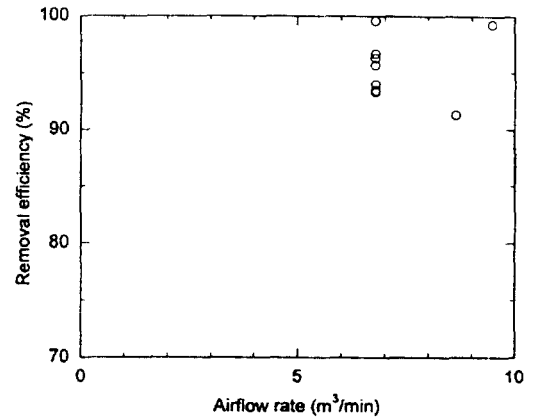


Fig. 6. Removal efficiency of SO₂ with the airflow rate and the inlet concentration.

켰을 때, 모든 풍량에 대해 SO₂가 90% 이상 제거됨을 알 수 있다. 풍량이 많은 경우에 대한 측정 데이터가 적으므로, 풍량에 따른 SO₂ 제거효율의 변화를 상세하게 살펴보기 위해서는 추가적인 실험이 필요하다고 생각된다. 또한, 풍량을 6.78 m³/min으로 고정시킨 후, SO₂의 입구농도를 27~420 ppb로 변화시켰을 때 SO₂ 제거효율은 모두 90% 이상이다. 누설 등으로 인한 실험장치 자체의 SO₂ 제거(손실)율은 공기청정기를 가동시키지 않은 상태에서 입구농도가 400 ppb일 때 약 5.3%이었다.

일산화질소(NO)의 입구농도를 150~180 ppb로 고정시키고, 풍량과 이산화질소(NO₂) 농도를 변화시켜 가면서 NO, NO₂ 및 NO_x 제거효율을 측정 한 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 그림을 보면, 풍량에 무관하게 NO 제거효율이 11~15% 정도이다. NO₂의 입구농도가 높아질수록 NO₂ 제거효율이 약간 증가하는 경향을 보였다.¹¹⁾ 그러므로, 입구농도 변화에 따른 제거효율의 변화를 조사하기 위해 풍량을 고정시키고, NO와 NO₂ 농도를 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. NO의 경우 풍량이 6.78, 8.57 m³/min일 때 입구에서의 NO 농도와 무관하게 NO 제거효율은 11~18%이었다.¹¹⁾ NO₂의 경우 풍량이 8.57 m³/min일 때 NO₂의 입구농도를 3배 정도 변화시켰으나 NO₂ 제거효율은 비슷하였다.¹¹⁾ 따라서, 본 실험에 사용된 습식 공기청정장치의 NO_x 제거효율은 NO, NO₂ 종류와 풍량에 무관하게 10~20% 정도임을 알 수 있다.

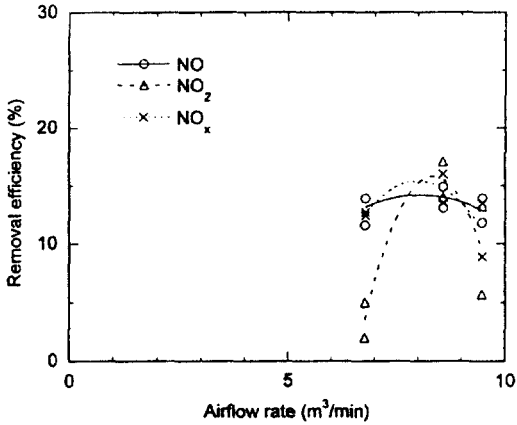


Fig. 7. Removal efficiency of NO, NO₂, and NO_x with the airflow rate.

HCHO의 입구농도 변화에 따른 HCHO 제거효율을 Fig. 8에 나타냈는데, 입구농도가 높을수록 HCHO 제거효율이 증가함을 알 수 있다. 대부분의 경우 HCHO 제거효율이 50% 이상이고, 특히 HCHO의 입구농도가 5 ppm 이상이면 제거효율이 80%를 넘었다. HCHO의 입구농도가 증가하면 액적 표면에서의 가스 농도 구배가 증가하여 액적이 가스를 보다 잘 흡수하게 되어 제거효율이 높아진다고 생각된다. 풍량 변화는 HCHO 제거효율에 별로 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.¹¹⁾ 한편, NH₃의 경우 입구농도가 110~163 ppm일 때 제거효율은 48~78%이었다.¹¹⁾

이와 같은 유해가스 제거효율의 차이는 대체로 가스 종류에 따른 액적에의 용해도 차이로 설명할 수 있다. Table 1은 실험대상 가스의 헨리상수(Henry's law coefficient)를 나타낸 것이다. 헨리상수는 기체와 수용액이 평형상태일 때의 용해 정도를 나타내는 지표이다. 제거효율이 높은 SO₂, NH₃ 및 HCHO는 제거효율이 낮은 NO와 NO₂에 비해 헨리상수가 약 10²~10⁶배 크다. 실험결과를 보면, 헨리상수가 큰 SO₂, NH₃, HCHO 중에서도 헨리상수가 1.24인 SO₂의 제거효율이 90% 이상으로 헨리상수가 6.3×10³인 HCHO의 제거효율(50~80%)보다 높다. 이것은 기체(유해가스)가 액적으로 흡수되어 제거되는 현상이 단순 평형상태가 아닌 물질전달속도에도 좌우되기 때문이다.

실험조건에서 알 수 있듯이 대상 기체를 포함한 공기가 많은 풍량으로 이동하여 액적과 충돌하면서

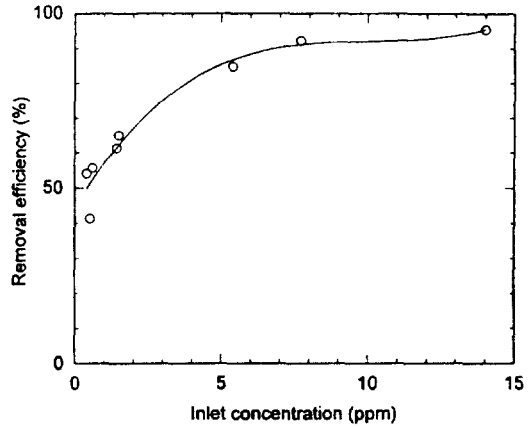


Fig. 8. Removal efficiency of HCHO with the inlet concentration.

Table 1. Henry's law coefficients of atmospheric gases tested¹⁹⁾

Gas	H (M atm ⁻¹ at 298K)
NO	1.9×10 ⁻³
NO ₂	1×10 ⁻²
SO ₂	1.24
NH ₃	62
HCHO	6.3×10 ³

기체가 제거되므로, 모든 액적과 기체가 평형상태를 유지하기 힘들다. 따라서, 실험결과로 얻은 유해가스 제거효율을 설명하기 위해서는 기체로부터 액적으로의 물질전달 현상을 고려하여야 한다. A기체의 기체로부터 액적으로의 물질전달속(mass flux, N_A)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_A = K_G (P_A - P_A^*) \quad (1)$$

여기서, K_G는 겉보기 물질전달 상수이고, P_A는 대기중 A 기체의 분압이고, P_A^{*}는 액적에 녹아 있는 A 기체의 주변 기체에의 평형 분압이다.

평형상태에서는 P_A = P_A^{*} 이므로, K_G에 포함된 헨리상수만으로도 기체의 제거효율을 설명할 수 있으나, 평형상태가 아닐 경우에는 (P_A - P_A^{*})에 따라 기체의 제거효율이 달라지게 된다. 그런데, SO₂의 경우 액적에서 반응하여 SO₄²⁻를 생성하게 되므

로, 액적 내 SO_2 농도가 거의 영(zero)이 된다. 수용액상에서의 SO_2 (4가 황, S(IV))의 산화 반응은 오존이나 과산화수소에 의한 산화 반응, 수용액에 미량으로 존재하는 철이나 망간에 의한 촉매 산화 반응 등 여러 경로로 진행된다.¹⁵⁾ 따라서, $P_A \approx 0$ 이 되어 물질전달속도가 증가하는 것으로 알려져 있다.^{15,19)} 즉, 반응에 의해 액적 내 SO_2 가 계속 제거되어 기체로부터 물질전달이 계속될 수 있는 것이다. 이와 같은 이유로 SO_2 의 제거효율이 헨리상수가 더 큰 NH_3 나 HCHO 에 비해 높다.

4. 결 론

본 연구에서는 정격풍량이 $12 \text{ m}^3/\text{min}$ 인 수평형 습식 공기청정장치를 대상으로 대표적 공기오염물질인 입자 및 유해가스의 제거 특성과 음이온 발생 특성에 관한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 기수분리기에서는 싸이클론의 특성으로 인해 입경이 $5 \mu\text{m}$ 이상인 입자가 주로 제거되고, 정격풍량에서 이들 입자의 제거효율이 50% 이상일 것으로 추정된다. 또한, 기수분리기와 함께 공기청정기를 가동시키면 입경이 $5 \mu\text{m}$ 이상인 입자의 제거효율이 70~90% 정도로 향상된다.

둘째, 중성능 필터에서는 입경이 $5 \mu\text{m}$ 이상인 입자는 거의 100% 제거되고, 입경이 $0.5 \mu\text{m}$ 이상인 입자도 65% 이상 제거된다. 또한, 공기청정기를 가동시키면 입경이 $0.5 \mu\text{m}$ 이상인 입자의 제거효율이 80% 이상으로 향상된다.

셋째, 공기청정기를 가동시키면 미세 입자가 발생되지만, 앞에서 언급한 바와 같이 기수분리기 및 중성능 필터의 입자 제거성능은 상당히 향상된다.

넷째, 공기청정기, 기수분리기 및 중성능 필터를 포함하는 전체 시스템에서는 입경이 $5 \mu\text{m}$ 이상인 입자는 거의 100% 제거되고, 입경이 $0.5 \mu\text{m}$ 이상인 입자도 65% 이상 제거된다.

다섯째, 수압이 높을수록 공기청정기로부터 음이온이 많이 발생되며, 수압이 $1.2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 일 때 발생된 음이온 농도는 $60,000 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 정도이다.

여섯째, 헨리상수가 큰 수용성 유해가스인 SO_2 ,

HCHO 및 NH_3 는 대체로 제거효율이 50% 이상으로 높으며, 특히 SO_2 는 제거효율이 90% 이상으로 매우 높다. 그러나, 헨리상수가 낮아 난용성 유해가스인 NO_x 는 제거효율이 10~20%로 수용성 기체에 비해 낮다.

일곱째, 습식 공기청정장치의 주요 구성요소의 기능을 종합적으로 살펴보면, 기수분리기는 입경이 $5 \mu\text{m}$ 이상인 조대 입자를 주로 제거하고, 중성능 필터는 이보다 작은 미세 입자를 주로 제거한다. 공기청정기는 주로 수용성 유해가스를 제거하고 음이온을 발생시키며, 부수적으로 기수분리기 및 중성능 필터의 입자제거 성능을 향상시킨다.

본 연구에서 실험적으로 얻은 입자 및 유해가스의 제거효율은 공기가 습식 공기청정장치를 한 번 통과할 때의 값이다. 그런데, 이 장치가 건물의 공기조화 설비로 사용되는 경우 외부공기가 일부 도입되고 대부분의 실내공기는 재순환되므로, 건물에서 실내 오염물질의 제거 효과는 매우 크게 된다.

본 연구에서는 공기청정장치의 기능 및 성능을 규명하기 위하여 실험적인 방법을 사용하여 각 구성요소의 역할을 규명하였고, 다양한 오염물질의 제거효율을 구하여 공기청정장치의 성능을 객관적으로 평가하였다. 현재 다양한 공기청정장치가 널리 사용되고 있으나 국내에는 이에 대한 연구가 거의 수행되지 않아 공기오염물질의 제거 성능에 대한 객관적인 평가방법이 정립되어 있지 않고, 객관적인 기술 자료도 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구를 통해 제시된 공기청정장치의 성능평가방법과 구체적인 성능 자료는 향후 이 분야의 연구를 수행하는데 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 논문은 (주)정일E&C의 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과의 일부이며, (주)정일E&C의 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 신동천, 이효민, 김종만, 정용, "일부지역의 실

- 내공기오염도와 건강에 미치는 영향에 관한 연구." 한국대기보전학회지, 6(1), 73~84(1990).
2. 송희봉, 민경섭, 한개희, 김종우, 백성욱, "대구 지역 공중이용시설의 실내·외 공기 중 기준성 오염물질의 농도," 한국대기보전학회지, 12(4), 429~439(1996).
 3. 배귀남, "습식 공기청정기," 공기청정기술, 8(2), 25~33(1995).
 4. 공업진흥청, 공기 청정기, 한국산업규격(KS C 9314-1994).
 5. 오명도, "공기청정기의 성능 시험 및 평가," 공기청정기술, 8(2), 48~70(1995).
 6. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Methods of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size, BSR/ASHRAE Standard 52.2P(Second Public Review Draft)(1996).
 7. 오명도, 김용진, 배귀남, 유경훈, "한국공기청정 협회 단체표준규격 실내용 공기청정기(안)," 공기청정기술, 11(1), 40~68(1998).
 8. 오명도, 유경훈, 이준식, "2단 평행판 정전식 집진기에서의 입자하전 및 포집," 대한기계학회논문집, 18(2), 432~445(1994).
 9. 오명도, 유경훈, "2단 평행판 전기집진기의 서브마이크론 입자 포집특성 실험," 공기조화냉동 공학논문집, 6(3), 237~246(1994).
 10. 최석호, 안강호, "동적 특성 방법을 이용한 실내용 공기청정기의 효율 평가," 1997 하계학술발표회 논문집(I), 공기조화냉동공학회, 용평, pp. 273~278(1997).
 11. 이춘식, 배귀남 등, 습식 공기청정 방식의 실내 오염물질 제거성능에 관한 연구, 한국과학기술연구원, BSI1657-5629-2(1995).
 12. Dirgo, J. and Leith, D., "Cyclone collection efficiency: comparison of experimental results with theoretical predictions," *Aerosol Sci. Technol.*, 4, 401~415(1985).
 13. 대기오염·소음·진동 공정시험방법, 개정2판, 동화기술, 서울(1994).
 14. Ogawa, A., Separation of Particles from Air and Gases, Vol. II, CRC Press, Inc., Boca Raton, U.S.A.(1984).
 15. Flagan, R. C. and Seinfeld, J. H., Fundamentals of Air Pollution Engineering, Prentice Hall, New Jersey, U.S.A.(1988).
 16. Hinds, W. C., Aerosol Technology, John Wiley & Sons, New York, U.S.A.(1982).
 17. 안강호, 배귀남, "필터여재의 성능평가," 공기조화냉동공학논문집, 6(4), 417~426(1994).
 18. 清水惠己, "水分子付加負イオン發生のメカニズムとその應用技術," 眞氣技術, 1(1), 5~10 (1994).
 19. Seinfeld, J. H., Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution, John Wiley & Sons, New York, U.S.A., p. 199(1986).