

&lt;학술논문&gt;

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.4.221>ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5324(Online)

## 응축성장을 이용한 PM2.5 초미세먼지의 무필터 제거

표 주 원\* · 이 동 근\*†

\* 부산대학교 기계공학부

### Filterless Removal of PM2.5 Dusts by Condensational Growth

Juwon Pyo\* and Donggeun Lee\*†

\* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received April 12, 2016 ; Revised November 29, 2016 ; Accepted January 8, 2017)

**Key Words:** Condensational Growth(응축성장), PM2.5 Ultrafine Dust(초미세먼지), Filterless Air Purifier(무필터 공기정화기)

**초록:** 본 연구에서는 부엌이나 밀폐 작업장과 같이 PM2.5 초미세먼지가 고농도로 발생하는 장소에 적용 가능한 무필터 초미세먼지 정화기술을 제안하고자 한다. 이런 장소에서는 기존 필터기반의 공기정화기는 높은 필터교체비용으로 인해 적용이 불가능하여 작업자가 고농도 PM2.5 초미세먼지에 직접 노출되는 심각한 문제가 있다. 입자가 수 마이크론의 크기로 성장하면 증가한 관성으로 쉽게 제거가능하기 때문에 본 연구에서는 초미세먼지의 응축성장에 집중하였다. 물분무를 이용하는 공기포화기, 수증기를 응축시켜 입자를 성장시키는 응축기, 멀티임팩터 제거기로 구성된 시제품을 개발하였고 낮은 유량의 랩스케일 실험에서 실제 공기청정기 유량 조건에서 그 성능을 검증하였다.

**Abstract:** We proposed a novel method to remove PM2.5 dusts without HEPA filters aiming at applications in kitchens or enclosed work spaces generating PM2.5 at high concentrations. Many workers are exposed to PM2.5 owing to lack of air purification because the high replacement costs of HEPA filters make their application impractical. A key idea is to use the condensational growth of nanoparticles. Once particles grow to the size of a few micrometers, it is much easier to remove them because of their increased inertia. We developed and tested a prototype consisting of an air saturator (equipped with water spray nozzles), a condenser in which humid air was cooled down to make the particles grow, and a multi-impactor assembly for collecting the grown particles.

### 1. 서 론

미세먼지 문제가 나날이 심각해지고 사회적 부담 비용도 커지는 상황에서 실내외 미세먼지에 대한 관심이 급증하고 있다. 미세먼지를 크기 별로 분류할 때 PM10으로 구분되는 10  $\mu\text{m}$  이하의 미세먼지는 호흡기에 걸려 객담으로 배출되는 등 비교적 제거가 쉽지만, PM2.5 즉, 2.5  $\mu\text{m}$  이하의 초미세먼지는 폐포나 혈관을 침투하여 심장마비, 천식, 기관지염, 폐렴, 폐암 등 각종 건강질환을 유

발한다.<sup>(1)</sup> 초미세먼지는 PM10 영역의 미세먼지에 비해 훨씬 큰 수 농도와 표면적을 가지지만 그 질량은 미미하기 때문에 중량법 기반의 예보에서는 그 위험 정도를 반영하지 못한다. 특히, 각종 연소 과정에서 발생하는 초미세먼지는 금속 및 유기성분을 포함하여 1 cc에 수천만 개까지 고농도로 생성되고<sup>(2,3)</sup> 이차적으로 변화와 성장을 거쳐 그 유해성이 더욱 커진다.

최근 실내 공기질에 대한 관심이 커지면서 공기청정기 시장이 급성장하고 있다. 대부분의 실내 공기청정기는 HEPA(High Efficiency Particulate Air)급 필터를 장착하여 초미세입자를 높은 효율로 제거할 수 있지만, 상대적으로 깨끗한 가정용의 경우에도 연 1회의 필터교체로 제품가격에 육박하는

† Corresponding Author, donglee@pusan.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

유지관리 비용이 발생한다.<sup>(4)</sup> 특히, 요리를 하는 주방<sup>(5)</sup>이나 용접 작업장<sup>(6)</sup> 등 고농도로 초미세먼지를 발생시키는 밀폐공간의 경우에는, 정화과정 없이 환기를 통한 배출에 그쳐 작업자가 고농도 초미세먼지에 직접적으로 노출되고 있는 실정이다. 왜냐하면 이러한 고농도 조건에서는 필터교체주기가 지나치게 짧아지기 때문에 경제적인 측면에서 필터식 공기청정기 적용이 불가능하기 때문이다. 따라서 다양한 종류의 고농도 초미세먼지 배출환경에 적용이 가능하며 HEPA급 필터없이 초미세먼지 정화가 가능한 무필터형 공기정화장치 개발이 작업자의 건강보건을 위해 시급히 요구된다.

본 연구에서는 물을 용매로 초미세먼지를 충분히 응축 성장시키면 증가한 관성으로 인해 기존의 관성충돌장치<sup>(7)</sup> 정도로도 쉽게 제거가 가능하다는 사실에 주목하였다. 나노입자의 응축성장에 대한 사전 연구수준을 살펴보면 다음과 같다.

응축입자 계수기(Condensation Particle Counter)<sup>(8)</sup>는 나노입자의 수농도를 측정하는 장치로서 이미 제품화되어 기술적인 검증은 되었지만, 부탄올을 주로 응축용매로 사용하고 1-2 lpm 정도의 저유량에서만 사용 가능하다.

물을 응축용매로 부유 입자를 성장시킨 후 수막에 충돌시켜 입자의 농축과 샘플링을 향상시키는 용도로 개발된 PILS(Particle-into-liquid Sampler)<sup>(9)</sup>의 경우, 단일 스텝 연속 공정으로 미세입자의 응축 성장에도 적용가능 하지만, 이 역시 운전 유량이 6 lpm 이하에 그쳐 실제 공기정화장치에 적용하기에 적합하지 않다. 고유량 조건에서 물을 용매로 입자를 응축 성장시키고 관성충돌장치를 이용하여 성장한 입자를 제거한 연구는 아주 드물게 보고되었다. Demokritou 등<sup>(10)</sup>은 냉매기반의 냉각장치를 사용하여 유입공기의 과포화 및 응축성장 후 관성충돌을 이용한 제거를 유도하였으나, 전력소모가 크고, 미세입자의 성장에 관한 확인이 되지 않으며, 적용 유량 2,500 lpm에서 포집효율이 50~70% 수준에 머물러 실제 상용화의 관점에서 많은 개선이 필요하다.

이에 본 연구에서는 실제 공기청정기 조건인 3,000~5,500 lpm의 고유량 환경에서 물을 응축용매로 고농도의 초미세입자를 수 마이크로미터까지 성장 및 제거 가능한 공기청정기 개발을 목표로 하였다. 먼저 랩-스케일의 저유량 조건에서 수십 나노미터 크기의 금속, 유기, 무기 나노입자를 수 마이크로미터까지 성장할 수 있는 최소 냉각조건을 실험적으로 확인하였다. 다음 고유량 조건에서

응축성장과 제거를 구현하기 위해 물 분무를 이용한 포화기, 수돗물을 이용한 판형 열교환기 또는 단열팽창 냉각을 이용한 멀티 노즐 타입의 응축기, 1 μm 미만의 차단(Cut-off) 직경으로 설계된 멀티 임팩터로 구성된 무필터 초미세먼지 정화장치의 시제품을 제작하였다. 이를 이용하여 상기 다양한 나노입자를 고농도, 고유량 조건에서 성공적으로 성장시킴으로써 HEPA필터 없이 90% 이상의 포집효율로 제거할 수 있음을 확인하였다.

## 2. 실험

### 2.1 저유량 실험

저농도/저유량 조건에서 단일 튜브형 응축 성장을 사용한 실험을 진행하였다. 시험 입자로 분무건조법<sup>(11)</sup>으로 제조한 평균입경 54 nm의 다분산 무기입자인 NaCl과 평균입경 100 nm의 단분산 유기입자인 PSL(Polystyrene latex)을 사용하였다. 나노입자는 응축성장 과정 중에 기체의 평균자유행정(Mean free path)보다 대부분 커서 아래 식으로 그 성장속도를 계산한다.<sup>(12)</sup>

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{4MD_v}{R\rho_p d_p} \left( \frac{p_{sat}(T_S)}{T_S} - \frac{p_{sat}(T_C)}{T_C} \right) \quad (1)$$

위에서 M은 수증기의 분자량,  $\rho_p$ 는 액적의 밀도,  $d_p$ 는 입자(액적)의 직경,  $D_v$ 는 수증기의 확산계수, R은 기체상수,  $T_S$ 는 포화기의 온도,  $T_C$ 는 응축기에서의 온도,  $p_{sat}$ 은 주어진 온도에서 수증기의 포화수증기압을 나타낸다. 포화수증기압은 온도에 민감하게 변화하므로 포화기 온도( $T_S$ )로 포화된 습공기가 응축기에서  $T_C$ 로 냉각되면 상대적으로 작은 온도차이( $\Delta T = T_S - T_C$ )로도 상당한 수준의 과포화도(Supersaturation ratio; S.S.R)를 얻을 수 있고 다음 식과 같이 과포화도에 비례하여 고속 응축성장이 가능하게 된다.

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{4MD_v}{R\rho_p d_p} \frac{p_{sat}(T_C)}{T_S} (S.S.R - 1) \quad (2)$$

이러한 응축성장을 실험적으로 증명하기 위해 먼저 포화기에 대해 설명한다.  $T_S$ 로 유지되는 버블러(Bubbler)에 건공기를 공급하여 포화 습공기를 만들거나 버블러 하단에 물 저장부를 두고 초음파 진동자를 설치하여 액적을 분무하여 공기를 포화시키는 두 가지 방식의 포화기를 사용하였다. 첫째로, 버블러식의 포화기에서 공급된 포화 습

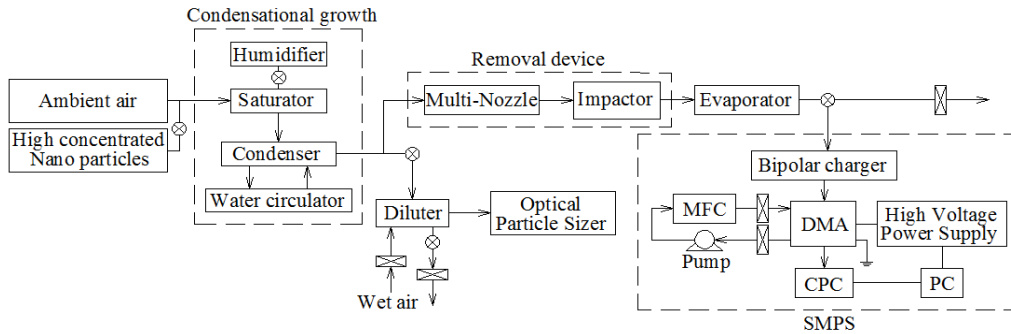


Fig. 1 Schematic of experimental setup for filterless removal of PM2.5 dusts using heat-exchanger condenser

공기 2 lpm과 분무 건조용 무화기(Atomizer)로부터 생성된 초미세 유기 PSL입자(100 nm)를 0.1 lpm의 유량으로 직경 1/2"의 스테인리스 관 내부에서 혼합하여 입자 유동을 포화시켰다. 응축기 온도 (T<sub>c</sub>)를 20℃로 고정한 후, 튜브형 전기로(F21100, Barnstead Thermolyne Corp.)를 이용하여 그 내부에 설치된 포화기(혼합) 튜브 온도를 60~80℃로 조정함으로써 온도차이를 40~60℃로 두고 입자 성장을 유도하였다. 응축기 튜브 출구에서 성장된 입자의 크기분포는 OPS(Optical particle sizer, Model 3330, TSI Corp)를 사용하여 측정하였다.

두 번째로, 초음파 진동자를 이용하여 물을 낮은 전력으로 무화시킨 후 30℃의 최소한의 가열만으로 포화 습공기를 만드는 포화기를 적용하였다. 0.4 lpm의 포화 습공기 유동과 무화기로부터 생성된 평균 직경 54 nm의 NaCl 입자 유동(0.6 lpm)을 균질 혼합하여 다음 단의 응축기로 공급하였다. 응축기의 온도를 20℃로 고정하여 포화기와 응축기 사이의 온도차이를 10℃부터 점차 증가시켜가며 성장된 입자의 크기분포를 OPS로 측정하였다.

2.2 대유량 실험

고농도/대유량 조건의 실험을 위해 8 개의 진동자를 설치하여 포화기로 사용코자 하였으나 높은 유량의 공기와 혼합이 원활하지 않았다. 대신 0.2 mm 직경의 상용 노즐(에이스노즐, FGD)을 사용하여 3 bar의 압력으로 물을 연속 분무하여 에어로졸 유동을 혼합없이 포화시키는 방식을 적용하였다. 3,000-5,500 lpm의 고유량 범위에서 30℃의 포화 습공기를 확보하기 위해 필요한 물 액적의 증발량은 식 (3)과 같이 이상기체 관계식을 통해 얻을 수 있다.

$$(P_{sat} - P_{in})Q_{tot} = \dot{m}_{H_2O}RT_S \quad (3)$$

위에서 P<sub>in</sub>은 포화기 유입공기의 수증기 분압을 나타내며 Q<sub>tot</sub>는 유입공기의 유량을 나타낸다. 초

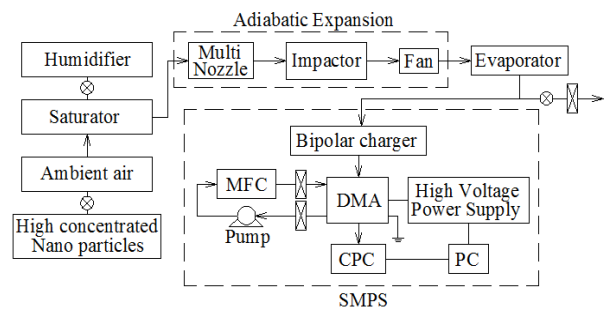
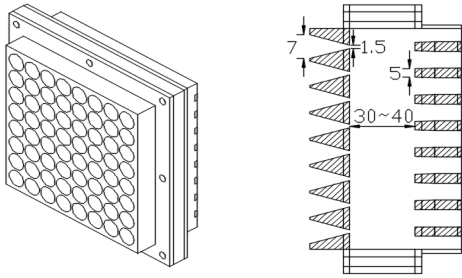


Fig. 2 Schematic of experimental setup for removal of PM2.5 dusts using adiabatic cooling through nozzles

기 상대습도 15%인 실내 공기 3,000 lpm을 포화상태로 만들기 위해 필요한 물공급율( $\dot{m}_{H_2O}$ )은 85 ccm으로 계산되었다. 물 액적의 실제 증발량과 벽면손실 등을 고려하여 실제 분무량은 필요 공급량의 2배 가량인 160 ccm으로 정하고 50%의 물을 회수하는 방법으로 상대습도 95% 이상의 균일한 고유량 포화 습공기를 얻을 수 있었다.

고농도/대유량 실험에서는 분무건조법으로 생성한 평균입경 54 nm의 다분산 무기입자인 NaCl과 증발응축법<sup>(13)</sup>을 이용한 평균입경 25 nm의 Ag 나노 입자를 시험입자로 사용하였다. 대유량 응축기로서, 수돗물을 냉매로 판형 열교환기를 이용한 냉각법과 노즐을 이용한 단열팽창 냉각법 두 가지를 고려하였다. 먼저 3,000 lpm의 유량조건에서 판형 열교환 응축기를 적용한 실험의 개략도는 Fig. 1과 같고, 5,500 lpm의 유량조건에서 단열팽창 냉각 응축기를 적용한 실험의 개략도는 Fig. 2를 통해 확인할 수 있다. 두 응축기를 통해 성장한 입자는 입구직경 7 mm, 출구직경 1.5 mm의 노즐 400개로 구성된 멀티노즐과 원형 충돌판 제거기(Fig. 3)을 통해 제거된다. 제거되지 않고 통과한 초미세입자는 원형전기기와 확산건조기(Diffusion dryer with silica gel)로 구성된 증발기(Evaporator in



**Fig. 3** Schematic of nozzle-impactor assembly for collecting ultrafine particles

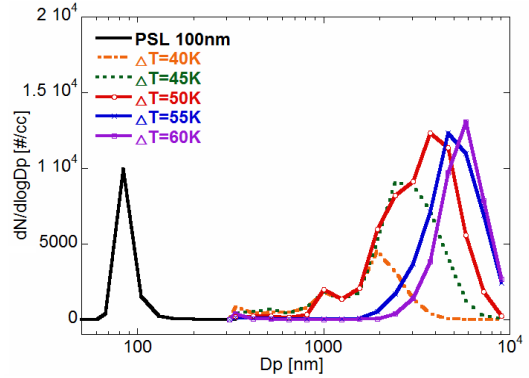
Figs. 1-2)를 통해 건조된 다음, SMPS(Scanning mobility particle sizer, Model 3936, TSI Corp.)를 통해 그 크기 분포를 측정한다. 응축기와 포화기를 작동하지 않으면 입자 성장이 이루어지지 않아 대부분의 나노입자가 시스템을 응축성장 및 제거없이 통과한다. 이 때 제거기 출구에서 측정된 입자의 크기분포는 당초 생성된 입자의 크기분포와 거의 차이가 나지 않아, 나노입자의 손실이 크기 않음을 알 수 있다. 응축기와 포화기를 작동할 때 제거기를 통과한 입자의 크기분포와 크기별로 직접 비교하여 전체 시스템의 포집 효율을 구하였다.

### 3. 결과 및 토의

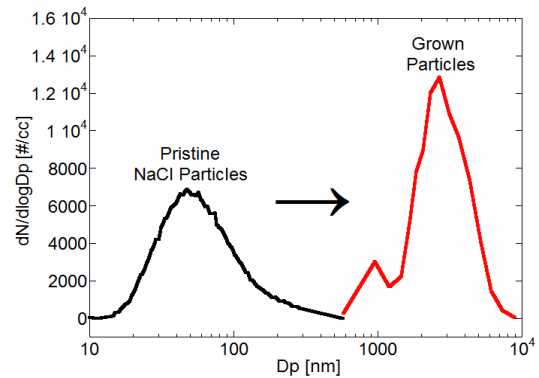
#### 3.1 초미세입자의 저유량 응축성장 실험 결과

100 nm의 단분산 PSL 입자를 버블리식 포화기와 응축튜브를 통해 응축 성장 시킨 실험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 100 nm PSL 입자의 유량을 0.1 lpm, 포화기로부터 공급되는 습공기의 유량을 2 lpm, 응축기의 온도를 20°C로 고정한 다음, 포화기의 온도를 60~80°C로 높여감에 따라 성장한 입자의 직경이 점차적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 실험 결과를 살펴보면 100 nm의 단분산 PSL 유기입자가 2 μm 이상으로 충분히 성장하였지만 그 크기분포가 비교적 넓다. 이는 포화 습공기와 초미세입자 유동 간의 불균일한 혼합의 영향으로 판단된다. 또한, 40°C 이상의 냉각으로 인해 포화기에서 공급된 습공기의 과포화도가 너무 높아져 과포화 증기의 핵 생성(Self-nucleation)과 빠른 응집 및 응축이 동시에 발생했을 것으로 추정된다. 포화기와 응축기간의 온도차이가 상당하여 에너지 소비의 관점에서 온도차이를 최소화하는 방향으로 다음 실험을 진행하였다.

물 증발을 최소한의 전력소비로 촉진시키기 위하여 저전력 초음파 진동자를 설치하여 무화시킨 후 30°C의 최소한의 가열만을 통해 포화 습공기를 공급하는 포화기를 적용하였다. 30°C의 포화 습공



**Fig. 4** Size distributions of PSL particles before and after condensational growth in a bubbler-installed lab-scale experiment



**Fig. 5** Comparison of size distributions of NaCl particles before and after condensational growth in an ultrasonic transducer-installed lab-scale experiment

기와 초미세입자 혼합물은 총 유량 1 lpm으로, 상온(20°C)으로 자연냉각되는 직경 0.5"의 스테인리스 튜브(응축기)로 공급되어 냉각됨으로써 과포화상태와 응축성장이 유발된다. 평균 입자 직경 54 nm, 전체 수 농도 4,285 #/cc의 NaCl 입자를 응축성장 시킨 결과, 10°C의 온도차(ΔT)와 0.4 s의 짧은 체류시간에도 Fig. 5와 같이 평균직경 2.6 μm로 잘 성장되는 것을 확인하였다.

#### 3.2 수냉식 열교환 응축기를 적용한 고농도 초미세입자의 대유량 응축성장 실험 결과

저농도/저유량 조건의 실험결과를 바탕으로 온도차가 10°C 이상 확보될 경우, 실제 공기 정화 장치의 대유량 운전 조건에서도 초미세입자가 잘 성장하는지 확인하였다. 2장에서 서술한 대로 대유량실험에서는 물 분무노즐을 이용한 포화기를 사용하였으며, 이때 확인된 30°C의 포화 습공기와 초미세입자를 3,000 lpm의 유량으로 응축기로 공급하였다. 실내에서 취급이 용이한 수돗물을 이용

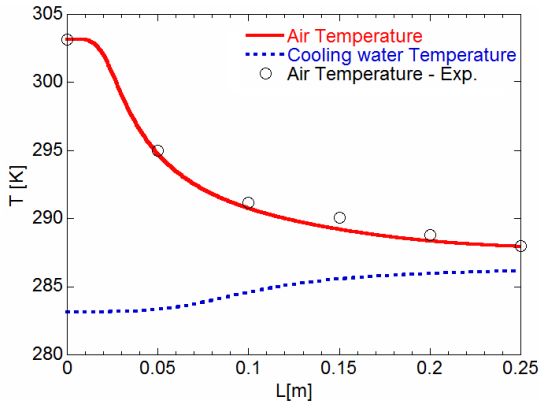


Fig. 6 Temperature profiles of air and water along the axial direction obtained by CFD simulation in comparison with experimental measurement

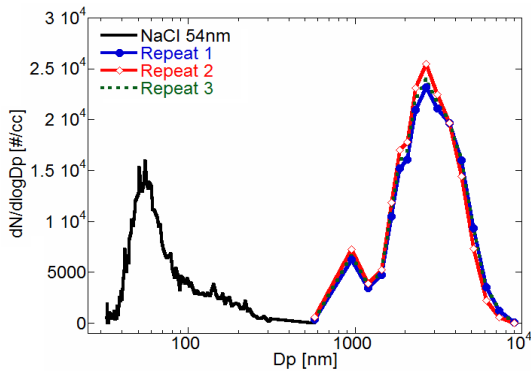


Fig. 7 Condensational growth of NaCl particles by a heat exchanger-installed condenser at 3,000 lpm

하여 15℃로 냉각시키는 수냉식 판형 열교환 응축기(water-circulation compact type heat exchanging condenser)를 적용한 실험을 진행하였다.

수치해석을 통해 19개의 격벽(습공기 측 9개 격벽과 냉각수 측 10개 격벽)을 가진 판형 열교환 응축부(0.3m×0.3m×0.25m) 내부에서 냉각수와 공기의 온도 분포를 유동방향의 위치별로 계산하여 공기측의 온도 측정값과 비교하였다. 그 결과, 계산값과 측정값이 유사한 온도 분포를 가지는 것을 확인하였다.(Fig. 6 참조) 또한, Fig. 7에서 나타낸 바와 같이, 응축기 내부에서 습공기의 온도가 떨어짐에 따라 내부 체류시간이 0.2 s인 경우에서도 수농도 7,655 #/cc의 평균 입자 직경 54 nm의 NaCl 입자가 평균 입자 직경 약 2~5 μm까지 충분히 성장하는 것을 OPS를 통해 확인하였다. 여러 번의 반복 실험에 대해서도 유사한 성능이 확보되는 것을 검증하였고, 장치 소형화를 고려할 때 온도 변화율이 상대적으로 완만해지는 0.1 m까지 길이를 줄이더라도 응축기 내부 유동의 온도가 18℃로

Table 1 Design parameters of  $Stk_{50}$  corresponding to 50% of collection efficiency for two types of inlets

Type of Impactor	$Stk_{50}$	$(Stk_{50})^{1/2}$
Circular jet	0.24	0.49
Rectangular jet	0.59	0.77

12℃가량 냉각되어 충분한 응축성장이 일어날 것이라 예측된다.

### 3.3조대입자 포집기 성능평가 시험 결과

공기는 20℃의 상온에서 그 밀도( $\rho_g$ )가 1.2 kg/m<sup>3</sup>이고 점성계수( $\eta$ )는 1.82x10<sup>-5</sup> kg/m·s이다. 2 μm 입자에 대한 미끄럼 보정계수<sup>(12)</sup>  $C_c$ 는 식 (4)에 의해 1.08이 되고, 포화 습공기와 초미세입자를 포함한 에어로졸의 전체 유량을 3,000 lpm으로 두고 출구 직경 1.5 mm인 원형 노즐 400개를 관성충돌장치에 적용하면 각 노즐 출구에서의 유량은 7.5 lpm이 된다.

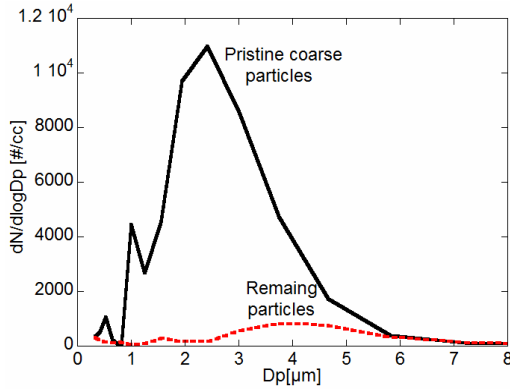
$$C_C = 1 + \frac{1}{Pd_p} [15.6 + 7.0 \exp(-0.059Pd_p)] \quad (4)$$

여기서 P는 절대압력으로 kPa 단위를 가지고 입자직경  $d_p$ 는 μm의 단위를 가진다. 또한, 충격판(Impactor)의 포집효율 50%에 대응하는 입경  $d_{50}$ 은 충격판의 차단 직경(Cut-off size)<sup>(12)</sup>로 알려진 설계변수가 되며, 식 (5)에 의해 약 0.9 μm로 계산되었다.

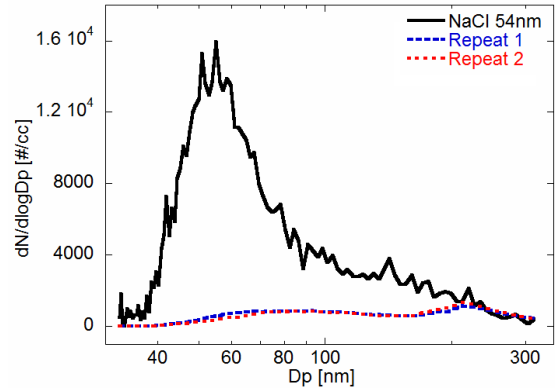
$$d_{50} \sqrt{C_C} = \left[ \frac{9\eta D_j (stk_{50})}{\rho_p U} \right]^{1/2} \quad (5)$$

$Stk_{50}$ 은 50%의 포집효율에 해당하는 Stokes 수로 원형 입구에 대응하는 0.24를 선택하였다(Table 1 참조). 요약하자면 평균 직경 54 nm의 초미세 NaCl 입자를 약 2 μm로 응축성장 시키면 높은 포집 효율로 제거할 수 있을 것으로 예상된다.

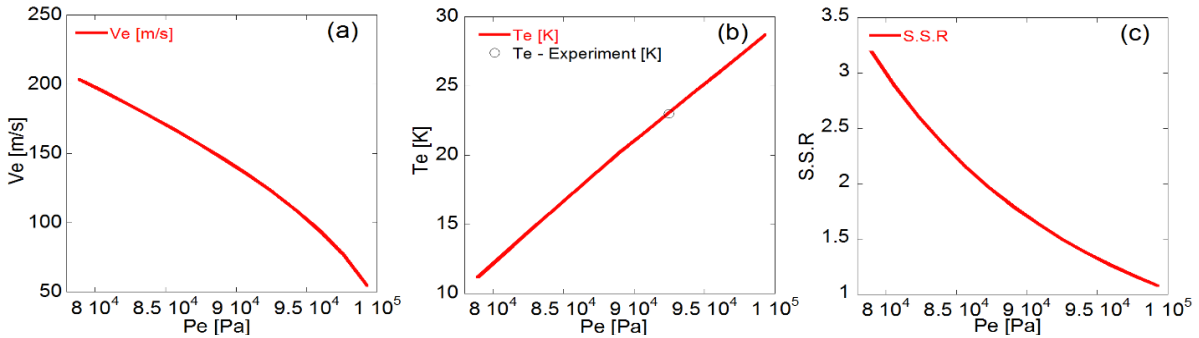
이에 입구직경 7 mm, 출구 직경 1.5 mm, 두께 3 mm인 원형 노즐 400개와 원통형 충돌판을 적용한 조대입자 제거장치(Fig. 3 참조)를 사용하여 다음과 같이 포집효율 측정 실험을 진행하였다. 1 m<sup>3</sup>의 시험 챔버에 초기 입자로 평균입경 2~4 μm인 상용 PTFE 입자(Polytetrafluoroethylene, TP-214)를 분무한 후, 챔버 내부에 상기 조대입자 제거장치를 두고 약 3,000 lpm의 유량으로 운전한 결과, 약 10분 후 Fig. 8과 같이 거의 전체 크기 범위에서 큰 수농도 감소를 확인할 수 있다. 수 농도에서



**Fig. 8** Comparison of coarse particle size distributions before and after 10 min. operation of multi nozzle-impactor assembly with 3,000lpm



**Fig. 9** Comparison of size distributions of particles measured at the exit of particle remover with on and off the saturator



**Fig. 10** Cooling effect of adiabatic expansion through a nozzle (a) velocity (b) temperature (c) supersaturation ratio of humid air downstream of the nozzle

큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8을 보면 비교적 크기가 큰 3~5 μm의 입자에 비해 2 μm 이하의 입자가 더 높은 효율로 포집되었음을 알 수 있다. 이는 흡입부와 배출부의 설계 및 위치상의 문제로 불완전한 공기 순환에 의해 큰 입자의 흡입이 잘 되지 않았기 때문이라 사료된다.

3.4 무필터식 공기정화장치의 성능검증 결과

수냉식 판형 열교환 응축기를 통해 성장한 입자는 직경 1.5 mm의 노즐 40개로 구성된 멀티노즐과 동일한 수의 원형 충돌판을 통해 제거되고 통과한 입자와 습공기는 증발기를 통해 건조된 후, SMPS로 수농도를 측정한다. 이 후, 수증기 분무 여부에 따른 입자의 제거 효율을 알아보기 위해 수증기를 분무하지 않은 경우에 제거기 출구에서 측정된 초미세입자 수 농도와 비교하였다. 실험 결과, Fig. 9에서 보인 바와 같이 평균입경 54 nm의 NaCl 초미세입자가 응축성장기 및 관성충돌장치를 거친 후, 70 nm 이하에서 90% 이상 제거된 것을 확인할 수 있다.

다음으로 시스템의 전력소모 개선과 부피 소형

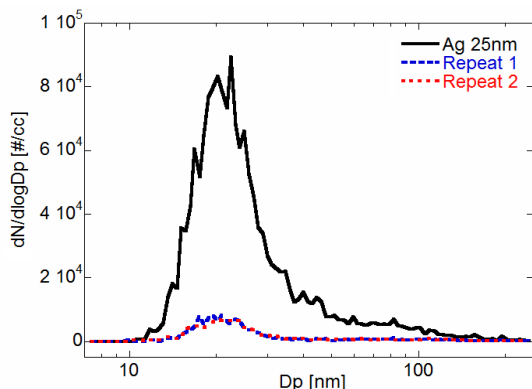
화를 위해 열교환기 없이 노즐자체를 단열팽창을 이용한 초고속 냉각응축기로 사용하는 경우의 설계와 검증 결과를 검토한다. 노즐출구에서 속도  $V_e$ 와 단열팽창냉각으로 인한 증기의 출구온도  $T_e$ 는 다음의 식 (6-7)로 표현된다.<sup>(14,15)</sup>

$$V_e = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} RT_i \left[ 1 - \left( \frac{P_e}{P_i} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right] + V_i^2} \tag{6}$$

$$T_e = T_i - \frac{1}{2C_p} (V_e^2 - V_i^2) \tag{7}$$

위에서 하첨자 i는 노즐 상류를 나타내고 하첨자 e는 하류를 나타낸다. 따라서  $P_i$ ,  $V_i$ ,  $T_i$ 는 상류에서의 압력, 유속, 온도를 각각 나타내고  $\gamma$ 는 비열비(공기의 경우 1.38), R은 기체상수이다.

전술한 직경 1.5 mm의 노즐 40개로 구성된 단열팽창 노즐 응축기를 사용한 경우에 대해 포집 성능 검증전에 먼저 이론적 검토 결과를 설명하고자



**Fig. 11** Comparison of size distributions of particles measured at the exit of particle remover with on and off the saturator in the nozzle-condenser-type air purifier

한다. 식 (6~7)과 포화수증기 식을 이용하여, 노즐 후단에서의 압력( $P_2$ )에 따라 노즐 출구에서의 속도, 온도와 이에 따른 과포화도를 계산하였고 Fig. 10(a), (b), (c)에 나타내었다. 멀티노즐 후단에서의 압력을 대기압보다 8 kPa 낮은 93 kPa의 압력으로 고정할 경우, 그림을 참고하면 30°C의 포화 수증기가 23°C로 7°C 정도 냉각되고 이 때 과포화도 (S.S.R.)은 1.5 정도로 응축성장을 시키기에 충분하다는 결과를 얻을 수 있다. 실제 팬을 5,500 lpm으로 가동할 경우 노즐후단에서 압력이 93 kPa로 측정되었고; 30°C의 포화 습공기와 수농도 24,755 #/cc, 평균직경 25 nm의 초미세 금속입자(Ag)를 주입할 때 노즐 후단에서 유동의 온도가 예측값과 아주 유사하게 23°C였다. 노즐 후단에서의 압력이 대기압보다 낮은 음압으로 유지되기 때문에 OPS를 이용하여 입자 크기분포를 측정하기에는 어려움이 있었다. 하지만, 수냉식 판형 열교환 응축기를 적용한 경우와 마찬가지로 멀티노즐과 원형 충돌관, 증발기를 거친 후, SMPS를 통해 수증기 분무 여부에 따른 입자의 제거 효율을 측정해 본 결과, Fig. 11과 같이 충분한 수농도를 가지는 크기 구간인 20-60 nm 영역에서 90% 이상의 높은 효율로 초미세 금속입자가 제거됨을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 초미세입자의 수증기 응축성장과 관성충돌을 이용하여 고농도 초미세입자의 무필터 제거법을 제안하고 높은 효율로 제거가능함을 실증 하였다.

먼저 랩스케일의 저유량 조건에서, 버블러 또는 초음파 진동자를 이용하여 공기를 포화시킨 후,

실온냉각 튜브를 이용하여 10°C의 냉각으로도 충분한 과포화도를 유발하였다. 그 결과 다양한 크기의 초미세입자가 구성물질에 무관하게 응축 성장함을 확인하였다.

고농도/고유량 조건에서 응축성장 실험을 위해 수냉식 판형 열교환기와 노즐을 이용한 단열팽창 냉각 응축기를 고려하였다. 실제 공기청정기에서 사용되는 팬을 결합하여 3,000~5,500 lpm으로 운전할 때, 초미세입자가 평균직경 2~5 μm로 충분히 성장하는 것을 확인하였다. 이어 0.9 μm 차단직경으로 설계된 관성충돌장치를 적용하여 성장한 입자를 제거한 결과, 대유량 조건에서도 효과적으로 초미세입자를 제거할 수 있었다. 결과적으로 유기, 무기, 금속, 비금속 등 다양한 조성의 초미세입자 (20-60 nm)를 필터를 사용하지 않고도 90% 이상의 높은 효율로 제거 가능함을 시연하였다.

본 연구에서 개발한 시스템은 아직 가정용으로 사용하기에는 소음과 크기 등에서 부족할 수 있다. 그러나 산업용 및 생물성 연소로부터 발생하는 초미세먼지 제거에 가장 적합하다는 점을 강조하고 싶다. 연소 배기시 원천적으로 고온 다습한 환경이 조성되어 본 시스템의 포화기가 불필요하고, 제시한 수돗물을 이용한 수냉식 열교환 응축기 또는 노즐을 이용한 단열팽창 냉각 응축기의 활용만으로도 공기 정화 성능 확보가 가능할 것으로 기대된다.

#### 후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Maynard, A. D. and Kuempel, E. D., 2005, "Airborne Nanostructured Particles and Occupational Health," *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 7, No. 6, pp. 587~614.
- (2) Sippula, O., Hokkinen, J., Puustinen, H., Yli-Pirilä, P. and Jokiniemi, J., 2009, "Comparison of Particle Emissions from Small Heavy Fuel Oil and Wood-fired Boilers," *Atmospheric Environment*, Vol. 43, No. 32, pp. 4855~4864.
- (3) Johansson, L. S., Tullin, C., Leckner, B. and Sjövall, P., 2003, "Particle Emissions from Biomass Combustion in Small Combustors," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 25, No. 4, pp. 435~446.
- (4) Fisk, W. J., Faulkner, D., Palonen, J. and Seppanen, O., 2002, "Performance and Costs of Particle Air

- Filtration Technologies,” *Indoor Air*, Vol. 12, No. 4, pp. 223~234.
- (5) Wallace, L. A., Emmerich, S. J. and Howard-Reed, C., 2004, “Source Strengths of Ultrafine and Fine Particles Due to Cooking with a Gas Stove,” *Environmental Science and Technology*, Vol. 38, No. 8, pp. 2304~2311.
- (6) Brand, P., Lenz, K., Reisinger, U. and Kraus, T., 2012, “Number Size Distribution of Fine and Ultrafine Fume Particles From Various Welding Processes,” *Annals of Occupational Hygiene*, Vol. 57, No. 3, pp. 305~313.
- (7) Marple, V. A. and Willeke, K., 1976, “Impactor Design,” *Atmospheric Environment*, Vol. 10, No. 10, pp. 891~896.
- (8) Stolzenburg, M. R. and McMurry, P. H., 1991, “An Ultrafine Aerosol Condensation Nucleus Counter,” *Aerosol Science and Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 48~65.
- (9) Orsini, D. A., Ma, Y., Sullivan, A., Sierau, B., Baumann, K. and Weber, R. J., 2003, “Refinements to the Particle-into-liquid Sampler (PILS) for Ground and Airborne Measurements of Water Soluble Aerosol Composition,” *Atmospheric Environment*, Vol. 37, No. 9~10, pp. 1243~1259.
- (10) Demokritou, P., Gupta, T. and Koutrakis, P., 2002, “A High Volume Apparatus for the Condensation Growth of Ultrafine Particles for Inhalation Toxicological Studies,” *Aerosol Science and Technology*, Vol. 36, No. 11, pp. 1061~1072.
- (11) Lee, D., Park, K. and Zachariah, M. R., 2005, “Determination of the Size Distribution of Poly-disperse Nanoparticles with Single-Particle Mass Spectrometry: The Role of Ion Kinetic Energy,” *Aerosol Science and Technology*, Vol. 39, No. 2, pp. 162~169.
- (12) Hinds, W. C., 1999, *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*, John Wiley & Sons, 2nd ed., Los Angeles.
- (13) Kousaka, Y., Niida, T., Okuyama, K. and Tanaka, H., 1982, “Development of a Mixing Type Condensation Nucleus Counter,” *Journal of Aerosol Science*, Vol. 13, No. 3, pp. 231~240.
- (14) Munday, J. T. and Bagster, D. F., 1977, “A New Ejector Theory Applied to Steam Jet Refrigeration,” *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 16, pp. 442~449.
- (15) Lee, K. S., Cho, S.-W. and Lee, D., 2008, “Development and Experimental Evaluation of Aerodynamic Lens as an Aerosol Inlet of Single Particle Mass Spectrometry,” *Journal of Aerosol Science*, Vol. 39, No. 4, pp. 287~304.