

ORIGINAL ARTICLE

VACES을 이용한 대기 중 입자상물질의 농축기술 및 특성 연구

박 정 호*

경남과학기술대학교 환경공학과

Characteristics of Aerosol Particle Concentration by the Versatile Aerosol Concentration Enrichment System (VACES)

Jeong-Ho Park*

Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology,
Jinju 660-758, Korea

Abstract

The versatile aerosol concentration enrichment system (VACES) have proven useful for providing elevated levels of atmospheric aerosol to human and animal exposures.

In this study, we describe a VACES and tests conducted to both optimize the enhancement factor (EF) and characterize how it depends on experiment conditions.

Particle number concentrations were measured from upstream and downstream of the system by scanning mobility particle sizer (SMPS) with a long differential mobility analyzer (DMA) in combination with a condensation particle counter (CPC). SMPS was used for to determine VACES particle EF. Particle EF tends to increase for higher the saturator temperature (T_{Sat}) and lower the condenser temperature (T_{Con}). T_{Con} higher than 0 °C and T_{Sat} lower than 50 °C was the best to obtain the most increase in particle concentration. Correlation analysis of EF with factor variables of T_{Sat} and T_{Con} resulted in correlation 0.662 and 0.416, respectively. With all five predictor variables included in a multiple regression model, the EF had a liner correlation with $R^2 = 0.643$.

Key Words : Aerosol, Concentrator, VACES, Enrichment factor

1. 서 론

지난 수십년간 질병학 및 독성학 연구에서 대기중 입자상물질(particle matter, PM)이 인간의 질병율이나 사망률 증가와 매우 밀접한 연관성이 있다는 많은 연구들이 지속적으로 발표되고 있다(Pope 등, 2002; Schulz 등, 2005; Thurston 등, 1994).

PM 중 공기 중에서 장기간 부유하면 인체 건강에 피해를 줄 수 있는 입경 10 μm 이하의 모든 입자상물질인 PM10은 생성과정과 크기에 따라 초미세(ultrafine, < 0.1 μm), 축적(accumulation, 0.1~2.5 μm) 그리고 조대(coarse, 2.5~10 μm) 등 크게 3가지 모드(mode)로 분류되고 있다. 이중 초미세와 축적 모드 즉, 입경

received 15 August, 2012; revised 2 June, 2012;

accepted 13 September, 2012

*Corresponding author : Jeong-Ho Park, Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 660-758, Korea
Phone: +82-55-751-3345
E-mail: jhpark@gntech.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2.5 μm 이하의 모든 입자들을 PM_{2.5}(fine particle)로 정의하고 있다(Baron과 Willeke, 2001; Whitby, 1978). 대기중 PM은 다양한 발생원(source)에서 배출되어지게 되는데, 특히 PM_{2.5}는 불완전 연소과정으로 발생한 가스상 물질이 대기중에서 가스→입자 전환과정에 따라 형성된다(Park과 Suh, 2005; Seinfeld과 Pandis, 1998). 많은 독성학 연구에서는 입자의 크기에 따라 미세입자(fine particle)가 조대입자(coarse particle)보다 더 강한 독성학적 악영향을 미친다고 보고되고 있다(Donaldson 등, 1998).

그러나 대부분 사람이나 동물을 대상으로 한 모델 결과에서는 짧은 접촉시간과 대기중 일반적인 PM 농도범위 내에서는 PM에 의한 뚜렷한 생리학적인 변화의 결과를 얻지 못하고 있었다. 이에 일반적인 대기중 PM 농도보다 아주 높은 농도로 만들 수 있는 농축장치(concentrator)를 개발하여 동물을 대상으로 한 노출실험에 사용하기 시작하였다(Barr 등, 1983; Dick 등, 2000).

그러나 기존 농축장치는 대부분 조대입자의 농축에는 효과적이거나 미세입자에는 효과적이지 못하였다. 또는 미세입자 농축 시에는 낮은 압력의 환경조건이 만들어져 이러한 실험환경 조건에서는 특별한 보조장치가 없는 한 실험동물들이 생존할 수 없거나 장치 운전시 높은 압력손실로 인해 농축효율이 낮아지는 등 여러 단점이 있었다. 이에 University of Southern California(USC) 등의 연구그룹들은 수증기(물)와 포화기(saturator), 응축기(condenser)를 이용하여 입자를 성장시키고 가상임팩터(virtual impactor)에서 거의 압력손실이 일어나지 않게 매우 효율적으로 PM을 농축시키고 경제적으로도 비싸지 않도록 Versatile Aerosol Concentration Enrichment System(VACES) 농축장치를 개발하였다(Kim 등, 2001). 또한 University of California Davis 연구그룹은 RSMS(Rapid Single-Particle Mass Spectrometer) 분석장비를 이용하여 VACES 농축과정시 PM의 화학적 조성변화를 평가한 결과 화학적 조성의 변화가 없는 거의 것으로 나타

나 VACES에 대한 효용성이 검증되고 있다(Zhao et al, 2005). 최근에는 대기오염물질중 수용성의 가스상 물질이나 semi-volatile aerosol에 대한 농축실험 결과나 mini-VACES 개발도 보고되고 있는 등 앞으로 다양한 종류의 대기오염물질에 대한 농축효과와 일부 기능적인 단점을 보완하여 효율적인 농축기술이 개발될 것으로 기대되고 있다(Geller 등, 2005; Jung 등, 2010; Pakbin 등, 2011).

한편, 본 연구에서는 기존 VACES의 몇 가지 기능적 단점을 보완하여 새롭게 제작하고 PM의 농축 최적조건을 찾기 위한 기초조사로서 포화기와 응축기의 온도변화 조절에 따른 농축계수 및 입경분포의 변화 특성 그리고 회귀분석을 통한 농축에 미치는 영향 인자를 파악하였다. VACES의 농축기술은 비교적 저렴한 농축기술로서 향후 국내에서도 PM으로 인한 건강피해영향을 규명하기 위한 연구에 많이 활용되길 기대한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치의 구성

본 연구에서 사용된 입자 농축장치인 VACES 시스템의 개략도를 Fig. 1에 나타냈다. 본 실험장치는 포화기(saturator), 응축기(condenser), 가상임팩터(virtual impactor) 그리고 수분건조기(dryer)로 크게 구성되어 있다. 기본적인 농축원리는 흡인펌프에 의해 유입된 외부공기는 포화기의 따뜻한 수증기와 접촉된 후 과포화 상태가 되고 다시 응축기에서 냉각 응축됨으로서 공기중 입자들이 성장하게 된다. 이렇게 성장된 입자들은 가상임팩터를 통해 분리입경(cut diameter)보다 큰 입자들이 다량 분리 농축되어지게 된다(Kim과 Lee, 1997). 본 연구에서는 입자의 성장과 응축 그리고 건조과정 등에서는 화학적조성 등 원래 입자의 특징에 변화가 없다고 가정하게 된다. 다음은 구성 장치별 특성은 다음과 같다.

2.1.1. 포화기(saturator)

포화기는 외부 유입공기를 따뜻한 수증기(물)와 접

축시켜 과포화 상태로 만들기 위한 장치이다. 따뜻한 물의 공급은 온도조절(30~60 °C)이 가능한 수욕조 (water bath)를 통해 초순수를 일정온도로 가온시킨 후 포화기에 유입시킨다. 포화기는 직경 약 10 cm, 길이 약 100 cm의 CPVC 재질의 파이프로 만들었으며, 수욕조에서 가온된 초순수는 펌프로 포화기의 약 1/2 높이가 되도록 일정하게 유입시킨다.

2.1.2. 응축기(condenser)

응축기는 포화기에서 과포화된 수증기를 통과시키면서 급속히 온도를 낮추게 되면 수증기속의 입자들은 응축 성장하게 된다. 온도조절이 가능한 냉각기(chiller)에서 적정온도(0~10 °C)의 냉매(coolant)를 내부직경 약 2.5 cm, 길이 약 100 cm의 SS 파이프로 만들어진 응축기로 흘려보냄으로써 따뜻한 수증기를 냉각 응축시키도록 되어 있다.

2.1.3. 가상임팩터(virtual impactor)

본 연구에서는 가상임팩터를 제작 사용하였는데, 성장된 입자들을 입경 약 2.5 μm의 분리입경으로 2단 분리하기 위한 장치이다. 가상임팩터는 2대의 흡인펌프를 사용하여 각각 주흐름(major flow, 100 L/min)과 부흐름(minor flow, 5 L/min)을 20:1로 유지시킴으로써 부흐름속 입자수의 농축계수(enrichment factor, EF)는 이론적으로 20배 농축이 가능하다. 한편, 가상임팩터는 수욕조에서 과도하게 데워진 초순수는 포화기에서 과도한 수증기가 발생시키고 이로 인해 가상임팩터에서 입경분리시 수증기가 물(water)로 전환되어 농축효율을 떨어뜨릴 수 있기 때문에 빠르게 발생하는 물을 배출시키기 위해 배수구(drain port)를 설치하였다.

2.1.4. 수분건조기(dryer)

부흐름을 따라 분리된 입자들은 과포화 상태이므로 원래의 입자형태로 전환시키기 위해서는 수분을 건조할 필요가 있다. 통상적으로 수분건조기로는 실리카겔을 많이 쓰고 있으나, 자주 교체를 해야 하는 불편함 등 때문에 본 연구에서는 Nafion막을 이용한 직경 0.1 cm, 길이 약 80 cm의 건조기를 사용하였다.

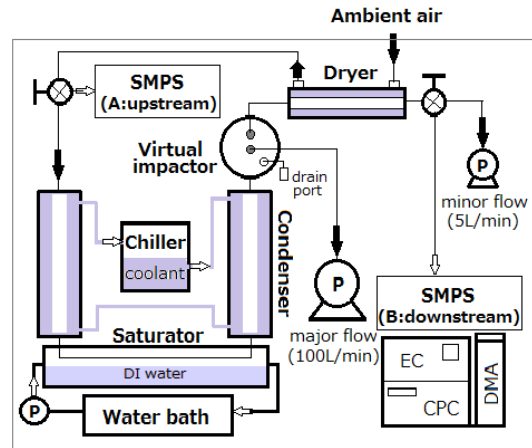


Fig. 1. Schematic diagram of the VACES system. (Location A & B : sampling location at upstream and downstream of the VACES)

2.2. 측정방법

본 연구의 실험은 University of California Davis에서 2011년 5월부터 약 1년간 VACES 실험시스템을 구축하고 포화기와 응축기의 온도변화 조절에 따른 입자의 농축 특성에 관한 현장실험을 한 결과이다. 본 연구에서는 총 흡인유량 105 L/min으로 대기중 공기시료를 흡인하였고, PM 농축실험의 결과는 대표적으로 농축계수(enrichment factor, EF)로 나타내어지며, 입구 지점(A:upstream)의 농도와 출구지점(B:downstream)의 개수(질량)농도비로서 산출되어진다.

일반 대기중 PM 농도인 입구지점과 VACES를 통과하여 농축된 출구지점에서 각각의 입경별 개수(number) 농도 측정은 DMA(TSI사, Model 3080)와 CPC(TSI사, Model 3775) 등으로 결합된 SMPS (scanning mobility particle sizer, TSI사, Model 3080) 분석장치를 사용하여 측정하였다.

입자농도 측정은 입구지점과 출구지점과 연결된 튜브에 교차밸브를 연결하여 번갈아 가면서 각각 입구 및 출구지점 농도를 각각 3회 반복 스캔을 통하여 평균 입경별 개수농도를 측정하였다. 측정 입경범위는 약 10~1,000 nm이며, 여기서 SMPS에서 측정되는 질량(mass) 농도는 공기역학적 직경의 농도로 계산된 추정값이며, 본 연구에서는 개수농도에 대한 비교 참고자료로 사용하고자 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 배경 농축실험

이상적으로 대기 중 입자상물질(PM)을 흡인 채취하는 장치는 시료도입과정에서 장치에 의한 화학적 조성, 농도, 입경분포 등 에어로졸 특성의 손실변화가 없어야 한다. 그러나 실제로 모든 시료채취장치는 가늘고 길다란 튜브, 굴곡부분, 물표면 등 시료 도입부분에서부터 장치내에 이르기까지 다양한 장치 내부구조 특성상 확산(diffusion), 퇴적(sedimentation), 관성침착(inertial deposition) 등 다양한 손실 메커니즘에 의해 일부분의 입자손실이 실험장치내에서 일어날 수밖에 없다(Baron과 Willeke, 2001; Fuchs, 1975).

본 VACES 농축장치는 포화→응축→분리농축→수분건조 과정을 거치면서 대기중 PM을 농축시키는 구조특성상 현장농축 실험에 앞서 장치 그 자체의 입자손실 특성인 배경(background) 농축실험의 진행이 필요하다. 여기에서는 본 실험에 앞서 장치내 입자손실 정도를 파악하기 위해 실제 현장실험조건과 동일하게 포화기에 높이 1/2 만큼 초순수를 채우고 다만 포화기나 응축기의 상태를 미가온 및 미냉각의 실온 상태에서 배경농축실험을 실시하였다. 여기서 입자손실(particle loss)의 계산은 식(1)과 같이 정의된다.

$$Particle\ loss\ (\%) =$$

$$\left(1 - \frac{\text{concentration of particle at downstream}}{\text{concentration of particle at upstream}}\right) \times 100 \quad (1)$$

Table 1에는 입구지점(upstream)과 출구지점(downstream)의 농도차이에 의한 개수(number) 및 질량

(mass) 입자손실율(particle loss)을 각각 나타냈다.

배경 농축실험과정에서 본 실험장치 자체에 의한 입자손실은 개수농도로 평균 $-17.5 \pm 8.3\%$ 로 나타나, 가늘고 긴 튜브, 굴곡부분 등의 장치구조 특성과 포화기의 물표면과 접촉 그리고 다양한 손실메커니즘에 의해 입자손실이 일어나는 것으로 판단된다(Hinds, 1998). 한편, 반대로 질량(mass)농도는 평균 $+7.9 \pm 3.0\%$ 의 농도증가가 나타났다. 이는 유입공기는 가늘고 작은 관(tube)과 포화기의 물표면과 접촉하면서 통과하기 때문에 일부 미세한 입자들이 서로 응집(coagulation)하여 큰 입자로 성장된다(Baron과 Willeke, 2001). 따라서 전체 입자개수는 줄어들지만 일부입자들은 응집에 의해 입자의 크기가 커지게 됨에 따라 오히려 질량농도는 증가하게 되는 것으로 판단된다. 다음의 입경분포 변화특성에서 대표입경이 다소 증가하는 변화차이도 이러한 원인으로 추정된다.

배경 농축실험에서 입구 및 출구지점의 개수입경분포 특성을 살펴보기 위해 Fig. 2의 (a)에는 Run 2 시료에 대해 예를 들어 나타내었고, (b)에는 전체시료에 대한 평균 손실입자수를 입경별로 나타냈다. (a)의 개수입경분포 특성을 살펴보면, VACES 장치를 통과하기 전후의 입구와 출구지점에서 개수농도(particles/cm³)는 $8.9 \times 10^3 \rightarrow 6.5 \times 10^3$ 로 26.2%가 줄어들었다. 또한 입경분포의 특징에서 중위경(median)은 52→59 nm, 산술평균입경(mean)은 71→80 nm, 최빈경(mode)은 40→46 nm 등 대표입경의 입자크기 변화가 약간 나타났다. (b)에 나타난 바와 같이 전체시료의 평균 손실입자수를 입경별로 보면 약 50 nm에서 최대 손실 peak를 가지는 특성을 보이고 있다.

그러나 입경별 입자손실은 본 연구에서 나타난 것

Table 1. Particle loss in the VACES at background tests

Experimental conditions	Run	Particle number concentration (particles/cm ³)			Particle mass concentration (μg/m ³)		
		upstream	downstream	Particle lose(%)	upstream	downstream	Particle lose(%)
(a) Saturator : no heat Condenser : no cool	1	8,520	7,820	-8.2	7.63	8.44	+10.6
	2	8,860	6,540	-26.2	6.82	7.18	+5.3
	3	6,380	5,550	-13.0	5.53	6.11	+10.5
	4	5,720	4,430	-22.6	5.42	5.71	+5.4
	(Ave.)			(-17.5±8.3)			(+7.9±3.0)

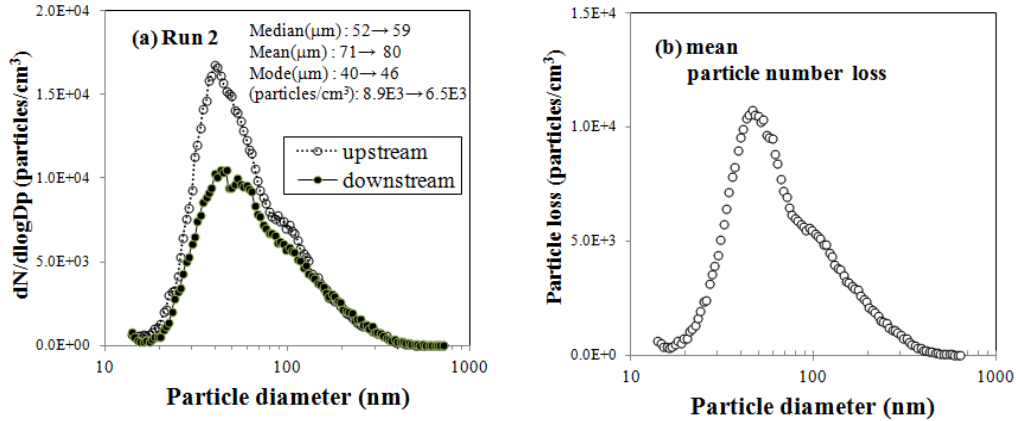


Fig. 2. (a) Particle size distributions of upstream and downstream at Run 2. (b) Mean particle number loss.

처럼 항상 50nm 전후에서만 최대 손실이 일어나는 것이 아니라 유입되는 대기중 입자의 입경분포 특성에 크게 반영될 것으로 판단되며, 본 실험장치에 의한 주요 입자손실 메카니즘은 주로 확산(diffusion)에 의한 것으로 추정된다. 통상 입자손실 메카니즘에서 300 nm 이하의 입자는 주로 확산(diffusion)과 일부 침강(sedimentation) 그리고 500 nm 이상의 입자는 큐브의 굴곡(bend)부분에서 관성충돌(inertial deposition)과 침강 메카니즘에 의해 대부분 손실되어진다고 보고되고 있다(Weiden 등, 2009).

3.2. 온도변화에 따른 농축계수(EF)

현장실험에서는 제작된 VACES 장치의 이론적 20 배까지 농축 가능한 최대 농축조건 또는 본 장치의 특성을 고려한 최적 농축조건을 찾고자 하였다. 통상 입자 농축에 있어 가장 큰 주요 인자는 응축기(condenser)와 포화기(saturator)의 온도 조건이므로, 본 연구에서는 응축기 온도 (T_{Con})를 $T_{Con} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 별로 그리고 포화기 온도 (T_{Sat})를 $T_{Sat} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 별로 각각 조절하면서 농축계수(EF)를 통해 농축특성을 평가하였다.

Table 2에는 응축기 및 포화기의 각각의 온도조건에서 개수 농축계수와 질량 농축계수의 결과를 나타내었고, Fig. 3에는 각각의 온도조건에서 개수 농축계수의 평균 결과를 나타냈다.

각각의 온도 조건별 개수농도의 농축계수 특성을

살펴보면, a) 실험조건 $T_{Con} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 경우 $T_{Sat} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 및 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 평균 EF가 각각 0.91, 0.73 으로 농축이 일어나지 않고 오히려 입자손실이 나타났다. 그러나 $T_{Sat} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 및 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 등 포화기의 온도를 점차 높수록 평균 EF가 각각 4.36, 16.15 으로 농축이 서서히 일어나기 시작하였다.

b) $T_{Con} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 경우 $T_{Sat} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일때 EF가 0.81 로 농축이 일어나지 않았으나, 포화기의 온도를 점차 높수록 농축이 되기 시작하였는데, 특히 $T_{Sat} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일때 EF가 21.46 으로 이론적 최대농축값(20배)에 근사한 값으로 나타났다.

c) $T_{Con} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 경우 $T_{Sat} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일때 EF가 20.00 로 이론적 최대농축값과 일치하는 것으로 나타났으며, 반면, $T_{Sat} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일때 EF가 13.88 으로 오히려 낮아져 포화기의 온도를 더 높일수록 오히려 농축계수가 떨어지는 결과가 나타났다. 이와 같은 현상은 d) $T_{Con} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 경우와도 비슷한데, $T_{Sat} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일때 EF가 25.17 이었으나 $T_{Sat} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일때는 EF가 19.30 으로 오히려 떨어지는 경향이 나타났다.

전반적으로 개수농도의 경우 응축기의 온도는 낮아질수록 그리고 포화기의 온도는 높아질수록 농축계수가 높아지는 경향을 보이고 있었다. 그러나 응축기의 온도가 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하에서 포화기의 온도를 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상 높게 되면, 과도하게 데워진 초순수로 인해 포화기에서 과도한 수증기가 발생되고 이로 인해 가상입력터에서 입경분리시 수증기가 물(water)로 전환되어 농

Table 2. Results of EF by temperature variation of condenser (T_{Con}) and saturator (T_{Sat}) in the VACES

Conditions	Temp.(°C), RH (%)		Particle number concentration		Particle mass concentration	
	Saturator (°C) / Condenser(°C)		Upstream (particles/cm ³)	EF of number	upstream (µg/m ³)	EF of mass
a)	10 / 30	30°C,	3.7E+03~5.2E+03	0.91±0.07	4.18~4.60	1.08±0.03
		42%	5.0E+03~6.0E+03	0.73±0.004	3.23~4.29	1.17±0.03
		50	4.3E+03~6.1E+03	4.36±1.89	3.19~3.74	6.95±2.09
		60	4.3E+03~5.3E+03	16.15±2.53	2.59~2.98	19.07±1.11
b)	5 / 30	27°C,	5.0E+03~5.7E+03	0.81±0.08	7.62~8.10	1.59±0.08
		50%	3.8E+03~5.3E+03	6.63±0.63	7.68~8.13	10.04±0.78
		50	3.0E+03~3.2E+03	17.45±0.71	6.50~6.81	19.73±0.14
		60	4.6E+03~6.6E+03	21.46±4.09	6.09~7.86	24.06±4.94
c)	0 / 30	32°C,	4.5E+03~6.1E+03	1.66±0.16	7.02~8.04	2.38±0.30
		35%	4.9E+03~9.6E+03	10.05±1.40	3.46~4.56	12.48±1.35
		50	3.8E+03~5.6E+03	20.00±3.18	2.95~3.90	22.11±3.07
		60	4.9E+03~7.4E+03	13.88±5.34	2.68~2.94	27.25±26.55
d)	-5 / 30	31°C,	4.1E+03~4.7E+03	7.96±0.18	5.62~6.74	10.84±0.54
		43%	4.1E+03~5.4E+03	14.15±1.32	6.47~7.12	16.87±1.94
		50	3.0E+03~3.8E+03	25.17±2.78	6.84~7.40	27.34±1.79
		60	2.2E+03~5.0E+03	19.30±6.49	5.81~8.67	16.98±5.16

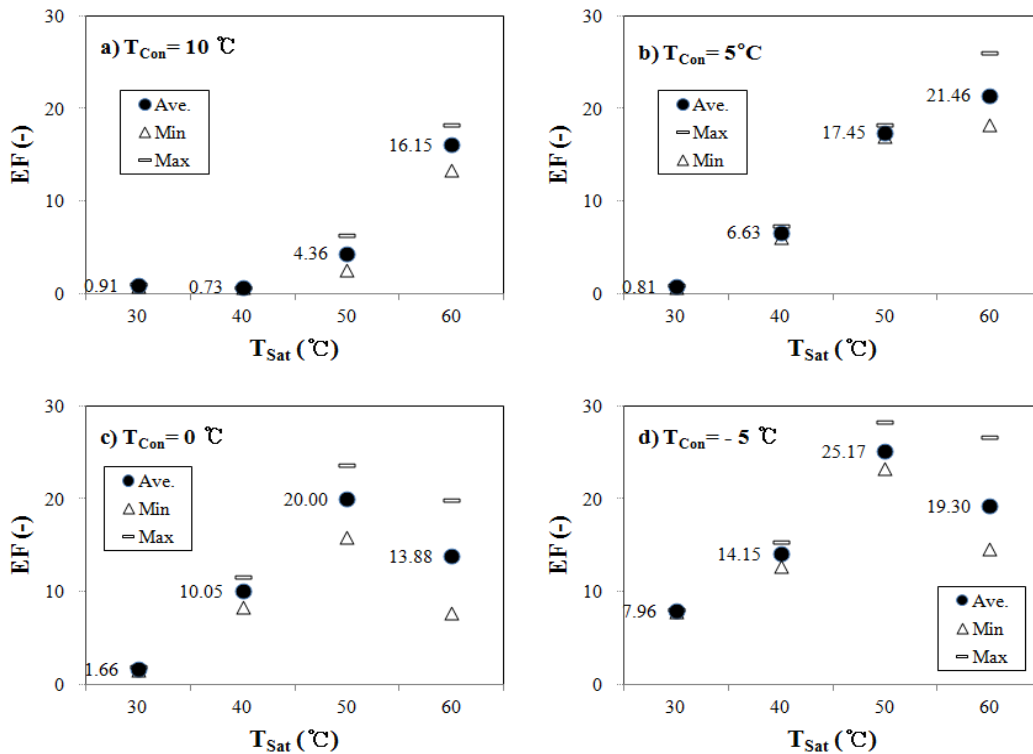


Fig. 3. EF characterization by temperature variation in the VACES. (condenser (T_{Con}) and saturator (T_{Sat}))

축효율을 떨어뜨리는 원인으로 판단되며, 실제 이러한 경우 가상입자의 배수구에서 물이 배출되고 있었다. 결국 농축 현장실험결과만 보아서는 이론적 최대농축을 위해서는 응축기의 온도는 0 °C 이하로 낮게 그리고 포화기의 온도는 응축기 온도를 고려하여 50~60 °C 이상으로 조절해야 한다. 그러나 포화기의 온도를 50°C 이상시 과포화 수증기가 물로 전환되어 농축효율이 오히려 떨어지는 결과와 마찬가지로 응축기의 온도가 0 °C 이하에서 장기간 VACES 사용시 과포화 수증기가 낮은 응축온도로 인해 얼음(ice) 덩어리로 변할 수 있어 순수한 입자 자체의 농축이 어렵게 될 수 있다. 따라서 VACES에서 최적농축조건은 응축기의 온도는 5~0 °C 범위 그리고 포화기의 온도는

40~50 °C 전후로 조절할 필요가 있을 것 같다. 향후 이러한 점을 유의하여 실험을 진행할 필요가 있을 것이다.

3.3. 개수입경분포의 변화 특성

여기서는 입자 농축특성을 개수입경분포로 보다 상세히 파악하기 위하여, 응축기 온도 (T_{Con}) = 0 °C 의 경우를 예로 들어 포화기 온도 (T_{Sat}) = 30 °C, 40 °C, 50 °C 및 60 °C 에서 나타난 각각의 대표적인 입구지점 (upstream)과 출구지점(downstream)의 개수입경분포와 중위경(median), 산술평균입경(mean), 최빈경(mode) 등 대표입경의 변화를 Fig. 4에 나타냈다.

T_{Con} = 0 °C 조건에서 각각의 입경분포 특성을 살펴

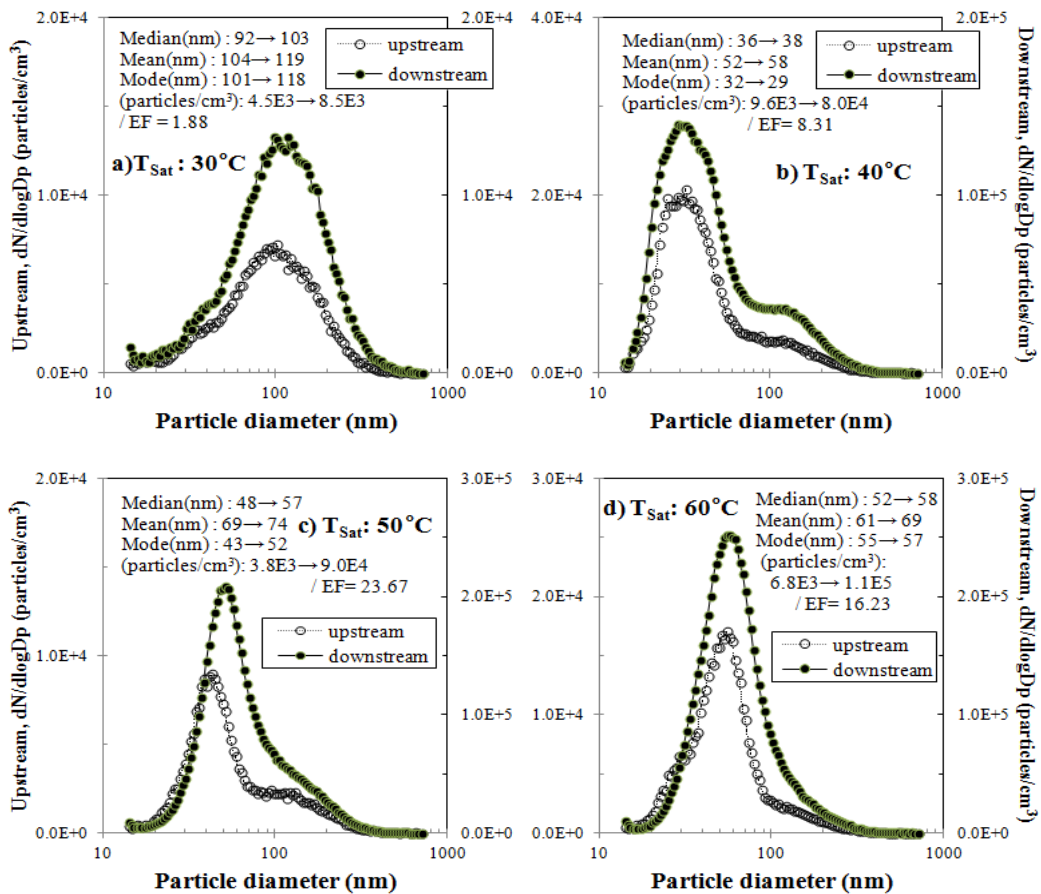


Fig. 4. Number size distributions of concentrated ambient particles by saturater temperature variation under condenser temperature, T_{Con} = 0 °C.

보면 다음과 같다. a) 실험조건 $T_{\text{Sat}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 경우, 입구 및 출구지점의 개수농도는 $4.5 \times 10^3 \rightarrow 8.5 \times 10^3$ (particles/cm³)로 EF는 1.88로 나타났다. 입경분포에서 median은 92→103 nm, mean은 104→119 nm, mode은 101→118 nm 등으로 각각 11 nm, 15 nm, 17 nm의 입경성장이 나타났다. b) $T_{\text{Sat}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 입구 및 출구지점의 개수농도는 $9.6 \times 10^3 \rightarrow 8.0 \times 10^4$ (particles/cm³)으로 EF 8.31로 나타났으며, median은 36→38(nm), mean은 52→58 nm, mode은 32→29 nm 등으로 각각 2 nm, 6 nm, -3 nm의 입경성장이 나타났다. c) $T_{\text{Sat}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 입구 및 출구지점의 개수농도는 $3.8 \times 10^3 \rightarrow 9.4 \times 10^4$ (particles/cm³)으로 EF 23.67로 나타났으며, median은 48→57 nm, mean은 69→74 nm, mode은 43→52 nm 등으로 각각 9 nm, 5 nm, 5 nm의 입경성장이 나타났다. d) $T_{\text{Sat}} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 입구 및 출구지점의 개수농도는 $6.8 \times 10^3 \rightarrow 1.1 \times 10^5$ (particles/cm³)으로 EF 16.23로 나타났으며, median은 52→58 nm, mean은 61→69 nm, mode은 55→57 nm 등으로 각각 6 nm, 8 nm, 2 nm의 입경성장이 나타났다.

결국 농축조건별로 다소의 차이는 있지만 농축과정에서 개수농도의 증가뿐만 아니라 입경분포의 최대

peak가 더 크게 증가하는 변화가 나타났다. 또한 농축 후 대표입경이 다소 증가하는 경향으로 나타나 입자 성장에 따른 원인이라 판단됨과 동시에 농축장치로 유입되는 입구지점의 입경분포 특성에도 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

3.4. 농축 패턴분석

여기서는 입자 농축에 영향을 미치는 인자를 평가하기 위하여, 앞서 나타낸 응축기 및 포화기의 온도조건별에 따른 개수농도의 농축계수(EF) 결과를 가지고 상관관계, 단일회귀분석, 다중회귀분석을 실시하고 그 결과를 Table 3에 나타냈다. 여기서 실험결과로 도출된 개수농도의 농축계수(EF)를 종속변수로 그리고 포화기온도(T_{Sat}) 및 응축기온도(T_{Con}) 그리고 기상조건 중 온도(T_{emp}), 습도(RH), 이슬점(dew point) 등을 각각의 독립변수로 하였다. 회귀분석에서는 회귀식에 포함되는 변수는 각 단계에서 적절한 통계적 유의수준($p < 0.05$)을 고려하여 입력하였다.

우선 각 인자별 EF와의 상관계수는 T_{Sat} 0.662, T_{Con} 0.416, T_{emp} 0.199, Dew 0.137, RH 0.111의 순으로 나타나 EF는 상대적으로 포화기 온도, 응축기 온도의 순으로 상관성이 높은 것으로 나타났다. 단일 회귀분석

Table 3. Results from correlation, single and multiple linear regression analysis

Analysis	Condenser temp., $T_{\text{Con}}(^{\circ}\text{C})$	Saturator temp., $T_{\text{Sat}}(^{\circ}\text{C})$	Temperature, $T_{\text{emp}}(^{\circ}\text{C})$	RH (%)	Dew point ($^{\circ}\text{C}$)
<i>Correlation analysis</i>					
coefficient	0.416	0.662	0.199	0.111	0.137
<i>Each single predictor variables in a single liner regression</i>					
coefficient	-0.645	0.475	0.585	-0.100	0.599
standard dev.	0.178	0.068	0.363	0.113	0.548
R^2	0.173	0.438	0.039	0.012	0.019
p-value	<0.001	<0.0001	0.113	0.380	0.278
<i>Two predictor variables in a multiple liner regression ($T_{\text{Con}}+T_{\text{Sat}}$, $R^2=0.613$)</i>					
coefficient	-0.651	0.476	-	-	-
standard dev.	0.123	0.057	-	-	-
p-value	<0.0001	<0.0001	-	-	-
<i>Four predictor variables in a multiple liner regression ($T_{\text{Con}}+T_{\text{Sat}}+T_{\text{emp}}+RH$, $R^2=0.621$)</i>					
coefficient	-0.624	0.470	0.419	0.054	-
standard dev.	0.148	0.059	0.594	0.189	-
p-value	<0.0001	<0.0001	0.483	0.774	-
<i>All five predictor variables in a multiple liner regression ($T_{\text{Con}}+T_{\text{Sat}}+T_{\text{emp}}+RH+\text{Dew}$, $R^2=0.643$)</i>					
coefficient	-0.574	0.470	-2.206	-0.998	2.618
standard dev.	0.148	0.058	1.514	0.590	1.393
p-value	<0.0005	<0.0001	0.150	0.096	0.065

(single liner regression) 결과에서도 T_{Sat} 및 T_{Con} 는 유의수준 0.05에서 모두 유의적인 것으로 나타난 반면 기상조건들은 유의적인 변수로 선택되지 않았다. 결정계수(R^2)는 T_{Sat} 가 0.438으로 상대적으로 가장 높게 나타나 1차적으로는 포화기의 온도가 입자농축에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 다중회귀분석(multiple liner regression)에서 독립변수를 각각 2개 ($T_{Con}+T_{Sat}$), 4개 ($T_{Con}+T_{Sat}+Temp+RH$), 5개 ($T_{Con}+T_{Sat}+Temp+RH+Dew$)를 이용하여 실시한 결과 결정계수(R^2)는 0.613, 0.621, 0.643 등으로 각각 나타났다.

결국 EF는 포화기 및 응축기의 온도변화에 큰 영향을 받고 있었으며, 일부 이슬점 온도 등 기상조건들도 입자농축에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결론

다양한 배출원에서 발생된 대기 중 입자상 오염물질(PM)은 대기 중에서 발생, 성장, 소멸과정 등 다양한 거동을 나타내면서 동시에 특히 인체 호흡기질환 등 인간의 건강에도 커다란 영향을 미치게 된다. 이러한 인체에 미치는 영향 특성을 동물 흡입챔버 실험을 통해 구체적으로 파악하기 위해서는 대기 PM에 대한 농축기술 개발이 필요하다. 본 연구에서는 VACES를 제작하고 PM의 최적농축조건을 찾기 위한 현장 기초 농축실험 결과 다음과 같이 정리하였다.

1) 본 장치의 배경 농축실험에서 개수농도로 평균 $-17.5 \pm 8.3\%$ 의 입자손실이 나타났다. 이는 본 장치내로 유입된 대기 에어로졸 입자들은 가늘고 긴 튜브와 굴곡부분을 통과하면서 또한 포화기의 물표면과 접촉 등으로 인해 일부분의 입자들이 장치내에서 확산, 침착 또는 응집 등 제거 메커니즘에 의한 손실원인으로 판단된다.

2) 응축기의 온도는 낮을수록 그리고 포화기의 온도는 높을수록 최대 농축계수(EF)를 얻을 수 있었으나, 응축기의 온도가 0°C 이하시 얼음(ice) 현상 또는 포화기의 온도가 50°C 이상시 수증기가 물(water)로 전환되어 오히려 농축효율이 떨어졌다. 따라서 최적 농축조건은 응축기의 온도는 $5 \sim 0^\circ\text{C}$ 범위 그리고 포화기의 온도는 $40 \sim 50^\circ\text{C}$ 전후로 판단된다.

3) 농축과정에서는 농축계수(EF)의 증가 뿐만 아니

라 입경분포의 최대 peak가 더 크게 증가하는 변화가 나타났으며, 농축후 입자성장에 따라 일부 대표입경이 다소 증가하는 경향이 나타났다.

4) 상관관계 분석 및 회귀분석 결과 농축계수(EF)는 상대적으로 포화기 및 응축기의 온도와의 상관성이 가장 높았고 다중회귀분석에서 포화기, 응축기 온도 및 기상조건 등 5개 인자를 모두 이용하였을 경우 결정계수(R^2)는 0.643으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 경남과학기술대학교 해외중기연수과정의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- Kim, M. C., Lee, G. W., 1997, Experimental Study of Virtual Impactors for Aerosol Concentration, Proceeding of the Meeting of KOSAE 1997, 138-140.
- Park, J. H., Suh, J. M., 2005, Physico-chemical characterization of individual particles emitted from the air pollution point sources, Journal of the Environmental Sciences, 14(8), 761-770.
- Baron, P. A., Willeke, K., 2001, Aerosol measurement : Principles, Technology, and Applications, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc..
- Barr, E. B., Hoover, M. D., Kanapilly, G. M., Yeh, H. C., Rothenberg, S. J., 1983, Aerosol concentrator - Design, Construction, Calibration, and Use, Aerosol Sci Technol, 2, 437-442.
- Dick, C. A. J., Stone, V., Brown, D. M., Watt, M., Cherrie, J. W., Howarth, S., Seaton, A., Donaldson, K., 2000, Toxic and inflammatory effects of filters frequently used for the collection of airborne particulate matter, Atmospheric Environment, 34(16), 2587-2592.
- Donaldson, K., Li, X. Y., MacNee, W., 1998, Ultrafine (nanometre) particle mediated lung injury, J. Aerosol Sci., 29(5/6), 553-560.
- Fuchs, N. A., 1975, Sampling of aerosols, Atmospheric Environment, 9, 696-707.
- Geller, M. D., Biswas, S., Fine, P. M., Sioutas, C., 2005, A new compact aerosol concentrator for use in

- conjunction with low flow-rate continuous aerosol instrumentation, *J. Aerosol Sci.*, 36, 1006-1022.
- Hinds, W., 1998, *Aerosol Technology : Properties, Behavior, and Measurement of airborne particles*, New York: John Wiley & Sons Inc..
- Jung, H., Arellanes, C., Zhao, Y., Paulson, S., Anastasio, C., Wexler, A., 2010, Impact of the versatile aerosol concentration enrichment system (VACES) on gas phase species. *Aerosol Science and Technology*, 44, 1113-1121.
- Kim, S., Jaques, P. A., Chang, M., Barone, T., Xiong, C., Friedlander, S. K., Sioutas, C., 2001, Versatile Aerosol concentration enrichment system (VACES) for simultaneous in vivo and in vitro evaluation of toxic effects of ultrafine, fine and coarse ambient particles. Part II: Development and Laboratory Characterization, *J. Aerosol Sci.*, 32, 1299-1314.
- Pakbin, P., Ning, Z., Eiguren-Fernandez, A., Sioutas, C., 2011, Modification of the versatile aerosol concentration enrichment system(VACES) for conducting inhalation exposures to semi-volatile vapor phase pollutants, *J. Aerosol Sci.*, 42, 555-566.
- Pope, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., Thurston G. D., 2002, Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution, *J. Am. Med. Assoc.*, 287(9), 1132-1141.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 1998, *Atmospheric chemistry and Physics*, New York: John Wiley & Sons Inc..
- Schulz, H., Harder, V., Ibaldo-Mulli, A., Khandoga, A., Koenig, W., Krombach, F., Radykewicz, R., Stampfl, A., Thorand, B., Peters, A., 2005, Cardiovascular effects of fine and ultrafine particles, *Journal of aerosol medicine*, 18(1), 1-22.
- Thurston, G. D., Ito, K., Hayes, C. G., Bates, D. V., Lippmann, M., 1994, Respiratory hospital admissions and summertime haze air-pollution in Toronto, Ontario-Consideration of role of acid aerosols, *Environ. Res.*, 65, 271-290.
- Weiden, S. L., Drewnick, F., Borrmann, S., 2009, Particle loss calculator - a new software tool for the assessment of the performance of aerosol inlet systems, *Atmos. Meas. Tech.*, 2, 479-494.
- Whitby, K. T., 1978, The physical characteristics of sulfur aerosol, *Atmospheric Environment*, 12, 135-159.
- Zhao, Y., Bein, K. J., Wexler, A. S., Misra, C., 2005, Fine PM, Sioutas C. Field evaluation of the versatile aerosol concentration enrichment system (VACES) particle concentrator coupled to the rapid single-particle mass spectrometer (RSMS-3), *J. Geophys. Res.-Atmospheres*, 110, DO7SO2:1-11.