

## Aerosol Particle Generator의 원리 및 특성

(Principles and Characteristics of Several Aerosol Particle Generators)

안 강 호\*  
Kang-ho Ahn

### I. Introduction

최근 전자기술의 발달, 초정밀도를 요구하는 기계의 발달등 부품의 초소형화, 초정밀화됨에 따라 제품의 생산성 및 신뢰성을 높이기 위하여 수  $\mu\text{m}$ , 혹은 submicron particle 에 대한 관심이 '80년대 들어오면서 점점 증가되었다. 특히 1 M RAM, 4 M RAM의 생산에 박차를 가하고 있는 전자 기술분야에서는 pattern의 size가 1  $\mu\text{m}$  정도로 작아짐에 따라 생산성과 직접 관계있는 submicron size particle control에 대하여 많은 관심이 집중되었다. S. Gunawardena et al., [1]에 의하면 모든 chip defect의 60~75%가 particle에 의하여 발생된다 하였다.

Aerosol이란 고체나 액체 상태의 particle이 기체에 부유되어 있는 상태를 말하며, 전자산업 분야에서는 아르곤, 질소, 헬륨 등의 기체에 있는 particle에도 많은 관심이 집중되어 있다. 이와같이 gas-borne particle에 대해 연구하는 분야를 Aerosol Science라 한다. 이 paper는 가장 기본적으로, Aerosol을 측정하는 기계의 표준화(Standardization) 및 Calibration에 필요한 Monodisperse Aerosol 만드는 technique과 polydisperse aerosol 만드는 technique에 대하여 기술하고, 다

음 기회에 측정기계 - 즉 Optical Particle Counter(OPC), Condensation Nuclei Counter(CNC) 등 - 의 Calibration과 기계들의 특성, High Efficiency Particulate Air(HEPA) filter test technique에 대하여 기술하겠다. 이 모든 technique은 대부분 University of Minnesota, Particle Technology Lab.에서 사용하거나 개발된 기술들이다.

### II. Monodisperse Aerosol Generation

Monodisperse Aerosol이란 Geometrical Standard Deviation ( $\sigma_g$ ) [참고 Appendix]이 1.0인 aerosol system - 즉 모든 particle의 크기가 동일한 것 - 을 말한다. 그러나 공학적으로  $\sigma_g \leq 1.1$ 인 aerosol system을 Monodisperse라 말한다. 이 이외의 Aerosol system을 Polydisperse Aerosol이라 한다.

모든 공학 분야에서 측정기계를 Calibration하기 위한 standard가 필요하듯이, Aerosol science분야에서는 정확한 크기의 particle과 정확한 particle의 갯수가 standard로서 꼭 필요하다.

Monodisperse Calibration and Test Aerosol generation technique으로는, 그림 1에서 보는 바와 같이, 1  $\mu\text{m}$  ~ 40  $\mu\text{m}$  범위내에서

\* Graduate Student, Particle Technology Laboratory, University of Minnesota Minneapolis, MN 55455

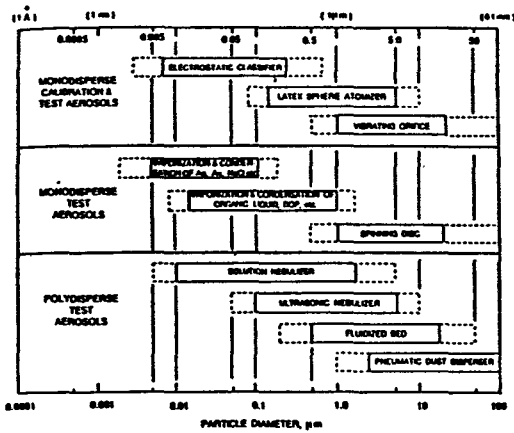


Fig. 1 . 입자발생장치의 원리별 작동영역

$\sigma_g = 1.01$ 의 정확도로 Vibrating orifice technique 이,  $0.087 \mu\text{m} \sim 90.7 \mu\text{m}$  범위내에서 [from DOW DIAGNOSTICS, p. o. Box 68511, Indianapolis, Indiana 46268]와  $0.085 \mu\text{m} \sim 2.99 \mu\text{m}$  범위내에서 [from Duke Scientific Corporation, 2415 Embarcadero Way, Palo Alto, CA 94303]  $\sigma_g \approx 1.06$ 의 정확도로 Latex Sphere Atomization technique 이, Submicro Aerosol Generation technique 으로  $\sigma_g = 1.02$ 의 정확도로 Electrostatic Classifier가 사용된다.

II-1 Vibrating Orifice Monodisperse Aerosol Generator (VOMAG)

Vibrating orifice monodisperse aerosol generator 는 Berglund 와 Liu(1973) [2]에 의해 개발된 기계로 매우 정확한 monodisperse aerosol 을 만들 수 있다. 원리는 그림 2 에서 보는 바와같이 piezoelectric ceramic 에 AC 전압을 주어 orifice 를 주기적으로 진동시킴으로써 orifice 를 통해 분사되는 액체 jet 를 균일한 크기의 액체 방울로 만든다. 이 액체 방울 (particle) 들을 turbulent jet 에 확산 시킴으로써 particle 기리의 충돌에 의한 다른 크기의 particle 형성을 막는다. particle 크기는

$$D_p = \left( \frac{6 Q_1 C_v}{\pi f} \right)^{1/3} \dots \dots \dots (1)$$

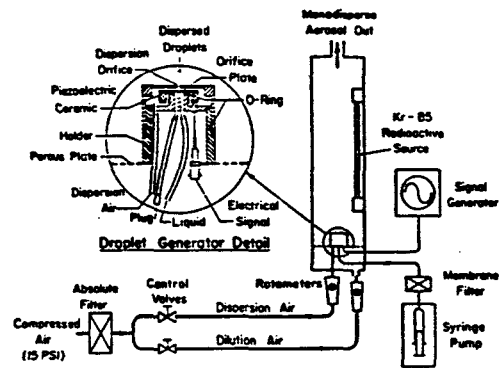


Fig. 2. Berglund-Liu vibrating orifice monodisperse aerosol generator

와 같이 계산되며, 여기서  $D_p$ 는 particle의 직경,  $Q_1$  은 orifice 를 통한 용액의 flowrate,  $C_v$  는 용매에 녹아있는 비휘발성 용질의 체적 농도 (volumetric concentration), 그리고  $f$  는 orifice 의 진동수이다. 직경 5, 10, 20  $\mu\text{m}$  의 orifice 를 사용하여 직경  $0.6 \sim 50 \mu\text{m}$  범위내의 monodisperse aerosol 을 만들 수 있다. particle 크기의 정확도는  $\sigma_g \leq 1.01$  이 내이다. particle 의 크기는  $f$  와 용액의 농도, orifice 의 직경,  $Q_1$  등을 잘 조합하여 얻고자 하는 particle size 를 만들 수 있다. 직경 5  $\mu\text{m}$  의 orifice 는 용액내의 고체 불순물들에 의해 자주 막히므로 사용상 주의해야하며, 굳이 사용하고자 할때는 아주 순수한 용매와 용질의 사용이 바람직하다. 발생된 particle 이 monodisperse 인지 알기 위해서 가장 많이 사용하는 technique 으로는 particle 의 drag force 가 particle size 의 함수인 것을 이용한 것으로, orifice 에서 발생되어 나오는 particle jet 에 공기를 수직되게 불때 particle jet 의 stream 이 한 줄이면 monodisperse particle 이 발생되고 있는 것이고, 2 줄 이상의 particle jet stream 이 생기면 bimodal 혹은 trimodal 의 aerosol 이 발생된다는 것을 알 수 있다.

VOMAG 는 OPC calibration (Liu et al., 1974 [3]), Inertial impactor calibration, turbulent pipe flow에서의 particle deposi-

tion 연구(Liu and Agarwal, 1974 [4]), 공기 sampling 기계의 inlet efficiency 측정 (Agarwal, 1975 [5]), electrical charging (Liu and Pui, 1977 [6]), neutralization 연구(Liu and Pui, 1974 [7], [8]) 등에 사용되어 왔다.

이 기계의 특성중의 하나는 droplet production rate 가 전기적 진동수  $f$  와 같으므로, 이론적인 particle concentration  $N_{th}$  는

$$N_{th} = \frac{f}{Q_a} \dots\dots\dots (2)$$

로부터 구할 수 있다.  $f$  는 전기적 진동수,  $Q_a$  는 전체 공기 유입량이다. 그러나 실제 particle concentration 은 system 내에서 생기는 particle loss 때문에 이론적인 particle concentration 보다 5% error 범위내에서 이 기계를 secondary concentration standard 로 사용할 수 있다.

이 기계의 작동 조건들은 표 1 에 요약되어 있다.

표 1. TSI I<sup>+</sup>사의 Vibrating Orifice Aerosol Generator 의 성능특성

Orifice 직 경 ( $\mu m$ )	진 동 수 (kHz)	액적직경 ( $\mu m$ )*	입자직경 범 위 ( $\mu m$ )**	농 도 (/cc)***
5	450	15	0.6 - 15	273
10	225	25	1.0 - 25	137
20	60	40	1.8 - 40	36

+ TSI Inc., P. O. Box 3394, St. Paul, MN 55165

\* 진동수를 조절하여 25% 이내에서 연속조정가능

\*\* 용액증발법에 의한

\*\*\* 100 l/min 의 표준운전상태에 대한 이론치

II-2 Latex Sphere Atomizer

Monodisperse Aerosol 을 만들 수 있는 가장 간단한 technique 으로, 이미 particle size 가 정해져 시판되는 PSL 을 물에 희석시켜

표 2. Dow Diagnostics\* 사의 단분산 Latex 표준입자

직 경	재 료
0.087-0.101	Polystyrene
	Styrene - Butadiene
2.020	Polyvinyltoluene
5.7, 7.6	Styrene divinylbenzene
15.8	Polystyrene
25.7, 45.4, 90.7	Styrene Divinylbenzene

\* Dow Diagnostics, P. O. Box 68511, Indianapolis, Indiana 46268, U. S. A

Spray-drying 방법을 사용한다. 표 2 는 시중에서 구할 수 있는 latex particle size 를 보여주고 있다. latex particle 을 aerosolize 하기 위해서, 먼저 original suspension 용액을 deionized 된 물에 희석시키고 극히 미소량의 iso-propyl alcohol 을 넣는다. 이 희석된 용액을 ultrasonic bath 에 10~20 분정도 넣어두어 multiplet 의 형성을 방지한다.

희석의 정도는 latex particle 이 atomized droplet 10개에 1개 들어갈 정도로 한다. 일반적으로, atomized droplet 의 대부분이 latex particle 을 갖고 있지 않기 때문에, 이 droplet 이 증발된 후 droplet 속에 있는 불순물들이 또다른 하나의 particle 을 형성할 수 있다. 예를 들어, 10  $\mu m$  의 droplet 안에 1 ppm( $10^{-6}$ )의 비 휘발성 불순물이 들어있을 경우 이 불순물은 0.1  $\mu m$  의 residue particle 을 형성한다.

그러므로, latex aerosol 은 residue particle 의 존재가 기계의 calibration 에 영향을 미치지 않는 기계에 사용해야 한다. 예를들어, latex aerosol 은 residue particle 에 영향을 받지 않는 Optical Particle Counter(OPC), Calibration 에 가장 많이 사용된다. 그러나 residue particle 에 민감한 Electrical Aerosol Analyzer(EAA)나 Condensation Nuclei Counter(CNC)등의 calibration 에는 적당하지 않다.

### II - 3. Electrostatic classifier

Liu and Pui[9]에 의해 개발된 이 기계는 0.01~1.0 μm 범위내의 submicro monodisperse aerosol 을 발생시키는데 사용된다. 기본 특성은 singly charged partide 의 전기적 (electrical) mobility 가 particle size 에 대해 일정하게 변하는 관계를 이용한 것으로, submicron particle 은 charge equilibrium 상태 (Boltzmann charge level)에서 전기적으로 중성이거나 혹은 ±1 charge 를 띄고 있다는데 근거하고 있다. 이 장치는 그림 3에 나타나 있다.

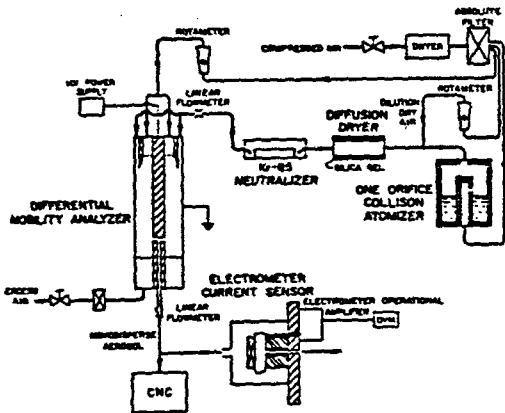


Fig. 3. Electrostatic classifier 개략도

Atomizer (후에 기술한 것임)에 의해 발생된 poly disperse aerosol 이 silica gel 에 의해 건조된 다음, krypton 85 방사능 source 에 의해 생긴 bipolar ions 에 의해 neutralize 된다. 이 aerosol 은 electrostatic classifier (혹은 DMA : differential mobility analyzer)에 의해  $\sigma_g \approx 1.02$  정도의 매우 정확한 크기의 monodisperse aerosol 을 얻을 수 있다. aerosol 의 electrical mobility 는 operating condition 과 mobility analyzer 의 dimension 에 의해 다음 식에서 구할 수 있다.

$$Z_p = \left[ q_c + \frac{1}{2} (q_a + q_s) \right] \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi VL} \dots (3)$$

$Z_p$  : electrical mobility

$q_c$  : flow rate of clean sheath air in the mobility analyzer.

$q_a$  : polydisperse aerosol flow rate entering the mobility analyzer.

$q_s$  : monodisperse aerosol flow rate leaving the mobility analyzer.

$r_1$  : inner radius of the mobility analyzer.

$r_2$  : outer radius of the mobility analyzer.

$L$  : length of the precipitating electrode between inlet & outlet.

$V$  : voltage difference between the inner & outer electrodes.

식(3)으로부터 electrical mobility  $Z_p$ 를 구한 다음

$$Z_p = \frac{e c}{3\pi \mu D_p} \dots (4)$$

로부터 particle 직경을 구할 수 있다.

$e$  : particle의 하전량

$c$  : Cunningham slip correction factor

$\mu$  : 기체의 점성계수

Cunningham slip correction factor  $c$ 는 1910년 Cunningham에 의해 유도되었다. particle size 가 기체의 평균자유행로와 비슷해 지면 particle 표면에서 particle 과 gas 와의 상대속도가 0이 아니므로(즉 slip flow가 생기므로) Stoke's law를 적용시킬 수 없다. slip correction factor 는

$$c = 1 + 1.246 \frac{\lambda}{(D_p/2)} + 0.42 \frac{\lambda}{(D_p/2)} \cdot \exp \left[ - \frac{0.87(D_p/2)}{\lambda} \right] \dots (5)$$

이며,  $\frac{\lambda}{(D_p/2)}$  는 Knudsen number, Kn으로 표시된다.

$\lambda = 0.0652 \mu m$ 는 293°K, 1기압에서 공기의 mean-free-path이다. 이 factor

$c$ 는 항상 1보다 같거나 크며 continuum regime, 즉  $Kn < 0.01$ 에서는  $c \approx 1$ 이다.

이 DMA에서는 표준 particle size를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, number concentration을 측정할 수 있다. DMA를 거친 monodisperse particle은 한개 이상의 전기량을 띄고 있으므로 그림 3에서 보는 바와 같이 monodisperse aerosol을 Faraday cup (electrometer current sensor)에 sampling하여 current를 측정할 수 있다. 다음 식에서

$$I = qeN \dots\dots\dots (6)$$

particle concentration  $N$ 을 구할 수 있다.

$I$ 는 current flow,  $q$ 는 Faraday cup에서 sample 한 aerosol flow rate,  $e$ 는 전자의 기본하전량,  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C, 이다. 그러나 실제로 몇몇의 particle은 2개 이상의 전자를 띄고 있으므로 correction factor,  $K$ 를 사용한

$$N = \frac{I}{ge} \cdot K$$

식을 사용한다.

매우 민감한 electrometer (Cary 401 vibrating reed electrometer, Varian instrument division, 611 Hansen way, Palo Alto, CA 94303)를 이용하여 Faraday cup

표 3. Mobility Classifier Generator의 Submicron 입자발생 운전조건 및 특성

Output Aerosol		Input Aerosol (1)		Operating Cond. of Mobility Analyzer			
Diamener $\mu m$	Nominal Max. Conc. $cm^{-3}$	Material	Solution Conc.	Flowrate(2) $q_c$ , lpm	Collector Rod Voltage(3), V		K factor (4)
			% by wt.		U of M	TSI	
0.013	5,000	NaCl	0.005	20	65	71	1.0
0.018	10,000	NaCl	0.01	20	123	134	0.99
0.024	50,000	NaCl	0.05	20	215	234	0.98
0.032	150,000	NaCl	0.1	20	373	406	0.96
0.042	300,000	NaCl	0.5	20	624	680	0.93
0.056	600,000	NaCl	1.0	20	1064	1159	0.90
0.075	600,000	NaCl	1.0	20	1807	1968	0.86
0.10	80,000	DOP	0.01	20	2994	3260	
0.13	80,000	DOP	0.04	20	4660	5075	
0.18	100,000	DOP	0.1	7	2750	2995	
0.24	200,000	DOP	0.6	7	4243	4620	
0.32	150,000	DOP	0.8	7	6381	6949	
0.42	40,000	DOP	1.0	7	9174	9990	

- (1) Input aerosol은 241 KPa의 Collision atomizer에서 나오는 NaCl( $\sigma_g = 2$ )과, 증발-재응축법에 의한 DOP( $\sigma_g = 1.2$ )이다.
- (2)  $q_c$ 는 깨끗한 sheath air 유량이며,  $q_a = q_s = 0.1 q_c$  이고,  $q_a$ 는 input에서의 다분산 aerosol 유량 및  $q_s$ 는 output에서의 단분산 aerosol 유량이다.
- (3) Collector 전압은 다음의 기준에 따랐다.  
Minnesota 대학 모델 :  $r_1 = 0.950 cm$ ,  $r_2 = 1.907 cm$ ,  $L = 45.52 cm$   
TSI사 모델 :  $r_1 = 0.937 cm$ ,  $r_2 = 1.958 cm$ ,  $L = 44.44 cm$
- (4) K는 CNC Calibration에 있어서 다중으로 하전된 입자의 영향을 고려한 보정계수로서, 모든 입자가 단전하를 띤 이상적인 경우의 입자농도에 대한 실제입자농도의 비로 정의된다

에 흐르는 전류  $10^{-16}A$  까지 잴 수 있다. 만약  $q = 22 \text{ lpm}$  이면 최소한 2 particles / cm<sup>3</sup> 까지 측정할 수 있다. 이 방법의 측정오차는 약  $\pm 5\%$ 이다. 표 3에  $K$  값을 비롯한 solution 의 농도등 DMA 를 사용하여 particle 만드는 특성들을 열거하였다.

DMA 를 사용하여 정확한 크기의 particle 를 만들기 위하여는,

i) classifier 에 넣을 polydisperse aerosol 의 number median diameter 가 얻고자하는 monodisperse aerosol 의 diameter 보다 작아야 한다.

ii)  $K,^{85}$  neutralizer 는 충분한 방사능을 방출하여 polydisperse aerosol 이 Boltzmann charge equilibrium 상태를 만족시켜야 한다.

iii)  $0.08 \mu m$  보다 큰 monodisperse aerosol 을 만들기 위해서는 polydisperse aerosol 의  $\sigma_g < 1.4$  를 만족시켜야 한다.

iv) mobility analyzer 안의 flow 는 laminar 이어야 하며,  $(q_a + q_s)/q_c$  를 작게해야 한다. 주로  $q_c : q_a = 10 : 1$ ,  $q_a = q_s$  를 표준으로 삼고 있다.

v) monodisperse aerosol 출구에는 conducting tube 를 사용하는 것이 좋고, 측정기에 monodisperse aerosol 을 집어 넣기 전에 반드시 neutralize 시켜야 한다.

i), ii), iii) 조건들을 반드시 만족시켜야 multiply charged particle 의 concentration 을 줄일 수 있다. 즉 DMA 는 같은 electrical mobility 의 particle 을 뽑아내기 때문에 계산된 unit charge 의 particle mobility 와 같은 mobility 의 계산된 particle size 보다 큰 multiply charged particle 이 나올 수 있다.

조건 i) 을 만족시키기 위해서는 input polydisperse aerosol 을 만들기 위한 collision atomizer 의 solution concentration 을 잘 선택하면 된다. 표 3에 solution concentration 과 number median diameter 가 표시되어 있다.

두번째 조건의 경우, Liu 와 Pui [7] 의 paper 를 참고하기 바란다.

세번째 조건의 경우, condensation aerosol generator (후에 기술한 것임) 를 사용하면 된다.

다섯번째 조건의 경우, insulating tube 에 전기가 축전되어 charge 된 particle 의 loss 를 줄이기 위한 것이다. metal tube (구리관) 를 사용하면 이 문제를 해결할 수 있다.

위의 3가지 monodisperse aerosol generation 에 의한 particle 크기의 정확도를 측정하기 위하여 University of Minnesota, Particle Technology Lab. 에서는 vibrating

표 4. DMA를 이용한 PSL 및 DOP입자의 직경측정치 비교

종 류	발 생 방 법	Dow Co. 규 격	입자직경계산치 (vibrating orifice)	실 측 치 (differential mobility)	오 차 (%)
DOP	vibrating orifice	—	0.890	0.888	+ 0.27
DOP	vibrating orifice	—	1.094	1.115	- 1.9
DOP	vibrating orifice	—	1.701	1.695	+ 0.35
PLS (LS-1010-E)	Spray-drying	0.357	—	0.338	+ 5.6
PSL (LS-061-A)	Spray-drying	0.365	—	0.345	+ 5.8
PSL (LS-1020-E)	Spray-drying	0.481	—	0.517	- 6.9
PSL (LS-1029-E)	Spray-drying	0.500	—	0.528	- 5.3
PSL (LS-1117-B)	Spray-drying	0.79	—	0.820	- 3.7
PSL (LS-1166-B)	Spray-drying	1.10	—	1.182	- 6.9

표 5. PSL 표준입자의 규격치(Dow Diagnostics Co.)와 실측치 비교

PSL I.D.	입 자 직 경, ( $\mu\text{m}$ )							Optical array(7)	
	Dow Co.	Mobility classification	우측실측치 평균	Electron microscopy			Light scattering		Centrifuge(6)
				(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
LS1010-E	0.357	0.338	0.334	0.33	0.318				0.354
LS061-A	0.365	0.345	0.340			0.336	0.342	0.339	0.343
LS1020-E	0.481	0.517	—		0.488				
LS1029-E	0.500	0.528	0.516	0.50	0.499				0.55
LS1117-B	0.79	0.820	—						
LS1166-B	1.10	1.18	—						

(1) Heard et al.

(2) Porstenorfer and Heyder

(3) Davidson and Haller

(4) La Mer and Plesner

(5) Dezelic and Kratochvil

(6) Stober and Flachsbarth

(7) Davidson and Colline

orifice generator 에 의해 만들어진 particle size 와 differential mobility analyzer 에 의한 particle size 를 비교하였고 또한 spray-drying technique 에 의한 PSL particle 와 differential mobility analyzer 에 의한 particle 크기를 비교하였다.

이 결과가 표 4 에 나타나 있다. vibrating Orifice aerosol 과 DMA aerosol 크기가 최고 1.9% 정도 차이를 보이고 있다. 그러나 PSL particle size 와 DMA particle size 는 최고 6.9% 까지 차이를 보이고 있다. 여러 연구자들도 이와 같은 PSL particle size 의 부정확성을 지적하고 있는데 표 5 에 요약되어 있다. 그러나 이들은 DMA particle size 의 정확성을 약 2% 범위 내에서 인정하고 있다.

### III. Polydisperse Aerosol Generation

일정하지 않은 크기의 particle 이 기체 속에 떠 있는 상태를 polydisperse aerosol 이라 한다. 예를 들면, 대기중의 먼지, 디젤 자동차의 매연, 담배연기, spray 에 의해 발생된 aerosol 등 대부분이 polydisperse aerosol 에 속한다.

#### III-1 Compressed Air Atomizer

Polydisperse aerosol 을 발생시키는 장치로 가장 간단한 방법으로 Atomizer 를 사용한다. 그 원리는 압축 공기로 액체를 분산시켜, 큰 droplet impaction 에 의하여 제거시키고 작은 size 의 droplet 을 만드는 것이다. 이렇게 하여 발생된 polydisperse aerosol 은 geometrical standard deviation ( $\sigma_g$ ) 이 1.7~2.5 정도이고, mean volume diameter 는 직경 1.5~6.0  $\mu\text{m}$  이다. 표 6 은 널리 사용되고 있는 atomizer 의 특성을 나타내 주고 있다. 대부분의 Nebulizer 는 최고  $10^6 \sim 10^7 \#/\text{cm}^3$  의 particle 을 발생시킨다.

Atomizer 는 여러시간 계속해서 사용할 수 있는데 시간이 지날 수록 용매의 증발에 의해 atomizer 통속 용액의 농도가 점점 증가하여 발생되는 particle 의 크기가 점점 커지게 된다. 이 같은 용매의 증발 현상을 제거하기 위하여 외부에 따로 용액통을 설치하여 용액의 recirculation 을 없애고, 일정한 농도의 용액을 syringe pump 혹은 suction feed system 을 사용하여 공급시킬 수 있게 고안되어 있다. 그림 4 는 University of Minnesota, Particle Technology Lab. 에서 개발한 constant out-

표 6. Nebulizer 의 종류별 작동특성 (Raabe, 1976)

Nebulizer	$\Delta P$ (psig)	A ( $\mu\text{l}/\text{u}$ )	W ( $\mu\text{l}/\text{u}$ )	Q (1/min)	VMD ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_g$
Dautrebande D-30	10	1.6	9.6	17.9	1.7	1.7
	20	2.3	8.6	25.4	1.4	1.7
	30	2.4	8.2	32.7	1.3	1.7
Lauterbach	10	3.9		(1.7)	3.8	2.0
	20	5.7	(12)	(2.4)	2.4	2.0
	30	5.9		(3.2)	2.4	2.0
Collison (3 jet model)	20	7.7	12.7	7.1	(2.0)	(2.0)
	25	6.7	12.6	8.2	2.0	2.0
	30	5.9	12.6	9.4		
	40	5.0	12.6	11.4		
Devilbiss #40	10	16	(10)	10.8	4.2	1.8
	15	15.5	8.6	13.5	3.5	1.8
	20	14	7.0	15.8	3.2	1.8
	30	12	7.2	20.5	2.8	1.8
Lovelace (Baffle screw set for optimum operation) at 20 psig) (63.10)	15	27	(10)	1.3		
	20	40	10	1.5	5.8	1.8
	30	31	11	1.6	4.7	1.9
	40	21	9	2.0	3.1	2.2
	50	27	11	2.3	2.6	2.3
Retec X-70/N	20	56	20	5.0	5.1	2.0
	20	53	12	5.4	5.7	1.8
	30	54	11	7.4	3.6	2.0
	40	53	7	8.6	3.7	2.1
	50	49	9	10.1	3.2	2.2
Devilbiss Ultrasonic (setting #4) (Somerset, Pa.)	—	150	33	41	6.9	1.6

$\Delta P$  : gage pressure

A : 출구측농도

W : 증발기 output

Q : 유 량

VMD,  $\sigma_g$  : droplet 분포 지수

주 : 모든 값들은 1기압, 21℃의 표준상태에 대한 환산치임.



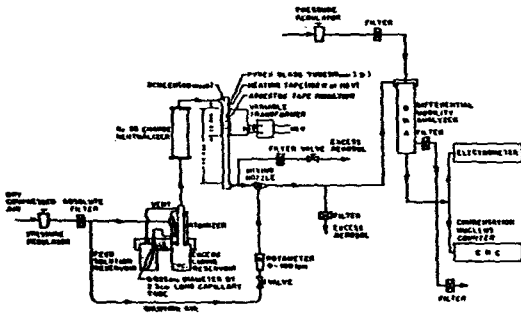


Fig. 4. CNC의 Calibration을 위한 표준 DOP 입자발생장치

put atomizer를 보여 주고 있다. 또한 이그림은 vaporization과 condensation section을 포함하고 있는데, atomizer에 의해 발생된 polydisperse 유기화합물, di-octyl phthalate (DOP) aerosol이 열에 의해 증발된 후, 응축되어 particle 직경  $0.03 \sim 1.3 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_g = 1.2 \sim 1.4$  정도의 monodisperse에 가까운 aerosol을 발생시킬수 있다. 이 장치를 condensation aerosol generator라 한다. 최근 실험 결과에 의하면 vaporization section의 온도를 높이고, 급히 냉각시키면  $\sigma_g \approx 1.01$ 의 monodisperse aerosol을 얻을수 있는 방법이 Minnesota 대학에서 개발되었다. Condensation aerosol generator의 또 다른 예로 sulfuric acid aerosol generator를 그림 5에 보여주고 있다. 이 장치는  $0.03 \sim 0.18 \mu\text{m}$  직경의 particle을 발생시켜 황산 aerosol이 동물의 건강에 미치는 영향의 연구에 사용되며,  $0.1 \sim 1\text{N}$ 의 황산 용액이 사용된다.

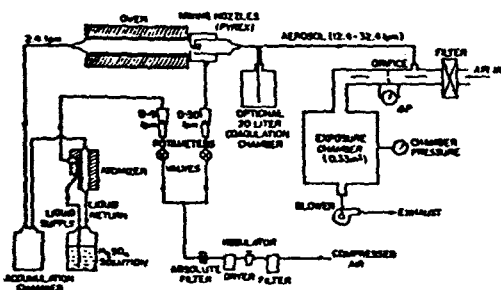


Fig. 5. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Aerosol 발생기 개략도

### II-2 Spinning Disk Aerosol Generator

Monodisperse aerosol에 가까운 monodisperse aerosol을 발생시키는 방법중의 하나로 spinning disk aerosol generator를 들수 있다. 직경 수 cm로 약  $3000 \sim 100000 \text{ rpm}$ 으로 도는 원판 중앙에 일정한 유량을 계속 공급하면 액체는 원심력에 의해 원판 위에 얇은 film을 형성하면서 원판 끝에서 부서지면서 particle을 형성한다. particle 크기는 원판의 반경 R, 회전속도  $\omega$ , 액체의 표면장력  $\gamma$ , 액체의 밀도  $\rho_L$ , 등에 의해 결정된다.

$$D_p \approx \frac{2.5}{\omega} \left( \frac{\gamma}{\rho_L R} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(8)$$

이 방법으로 직경  $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 의 droplet을 만들 수 있으며  $\sigma_g = 1.1 \sim 1.2$  정도의 monodisperse에 가까운 particle을 얻을수 있다.

### III-3 초음파 Aerosol Generator

Piezoelectric crystal에 의하여 발생된 초음파를 액체 표면에 집중시키면, 액체 표면이 원추 모양의 분수를 형성하면서 부서져 고농도의 작은 particle( $3 \sim 7 \mu\text{m}$ )을 발생시킨다. 이 원리는 초음파 가습기와 같으며 이렇게 발생된 particle은 약  $\sigma_g \approx 1.5$ 이다.

### III-4 Fluidized Bed Aerosol Generator

지금까지 기술한 polydisperse aerosol generator의 특성은 액체 혹은 액체에 녹을 수 있는 고체 물질(NaCl 등)을 aerosolize 하는데 사용할 수 있는 것들이었다. Marple et al., (1978)[18]은 그림 6에서 볼 수 있듯이 고체 particle이 chainfeed mechanism에 의해 일정한 양의 particle이 fluidized bed 안으로 들어가 공기중에 균일하게 분산되도록 되어 있다.

이 장치로 aerosol의 Mass concentration  $170 \text{ mg}/\text{m}^3$  까지 발생될 수 있으며 주로 coal, Arizona road dust, silica, copper ore rock dust 그리고 potash등의 particle을 발생시키는데 사용되고 있다.

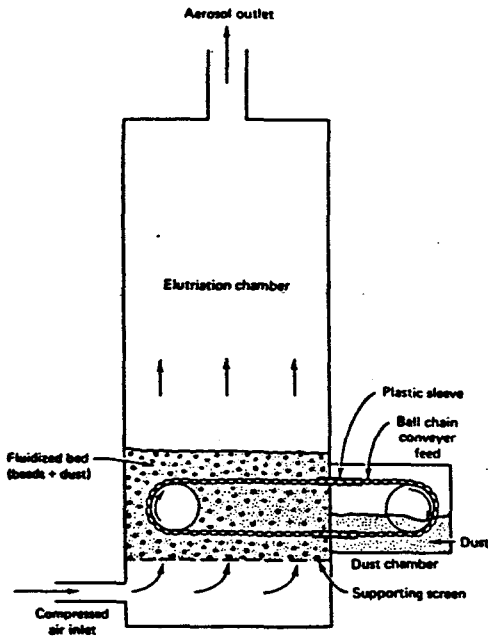


Fig. 6. Schematic diagram of fluidized bed aerosol generator  
(유동층 입자발생기의 개략도)

### ■-5 Exploding Wire Generator

충전된 전기적 energy를 매우 가늘은 금속선에 가했을 때 금속선의 폭발에 의하여 금속 혹은 금속 산화물의 particle을 발생시키는 방법이 있다. 일반적으로 1 joule의 전기적 energy로 금속성을 증발, 산화시켜 고농도의 금속, 금속 산화물의 particle을 발생시킬 수 있다.

### IV. 결 언

지금까지 Aerosol Generation Technique에 대하여 기술하였다. 측정기계를 calibration하기 위하여 어떤 aerosol generator를 선택하여야 하며, particle의 종류, 크기, concentration range, 그외 generator의 stability, accuracy, precision, repeatability 등을 고려하여야겠다.

### V. Acknowledgement

이 paper에 인용된 도표와 그림을 사용하

도록 허락 해주신 Benjamin Y. H. Liu 교수에게 감사드린다.

### Appendix

Aerosol Science 분야에서 particle의 크기, 표면적, 무게 분포를 표시하는 방법으로 log-normal distribution을 사용한다.

Geometrical mean diameter,  $\bar{x}_g$ , 는

$$\ln \bar{x}_g = \frac{\sum \Delta N_i \ln x_i}{N}$$

로 표시되며 N은 total number,  $\Delta N_i$ 는  $i^{th}$  size particle 갯수,  $x_i$ 는  $i^{th}$  size particle diameter 이다.

Geometrical standard deviation,  $\sigma_g$  는

$$\ln \sigma_g = \left[ \frac{\sum (\ln x_i - \ln \bar{x}_g)^2 \Delta N_i}{N} \right]^{1/2}$$

로 나타낸다.

$\bar{x}_g$ 와  $\sigma_g$ 를 구하는 방법은  $x$  축은 log scale,  $y$  축은 probability scale graph에 cumulative distribution curve를 그려  $y$  축의 50% 되는  $x$  축의 particle diameter가  $\bar{x}_g$ 이다.

$\sigma_g$ 는 다음식에서 구한다.

$$\sigma_g = \frac{x_{84.1}}{\bar{x}_g} = \frac{\bar{x}_g}{x_{15.9}} = \left( \frac{x_{84.1}}{x_{15.9}} \right)^{1/2}$$

$x_{84.1}$ 은  $y$  축의 84.1% 되는

$x$  축의 particle diameter

$x_{15.9}$ 는  $y$  축의 15.9% 되는

$x$  축의 particle diameter 이다.

### 참 고 문 헌

1. S. Gunawardena, U. Kaempf, B. Tullis, and J. Vietor, (1985). "SMIF and its Impact on Clean-Room Automation", Microcontamination: pp. 55.
2. R.N. Berglund and B.Y.H. Liu (1973), "Generation of Monodisperse Aerosol Standards", Environ. Sci. Technol. 7: p. 147.

3. B.Y.H. Liu, R.N. Berglund, and J.K. Agarwal (1974) "Experimental Studies of Optical Particle Counters", *Atmos. environ.*, 8: p. 717.
4. B.Y.H. Liu and J.K. Agarwal (1974) "Experimental Observation of Aerosol Deposition in Turbulent Flow", *J. Aerosol Sci.*, 5: p. 145.
5. J.K. Agarwal (1975) "Aerosol Sampling and Transport", Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, MN55455
6. B.Y.H. Liu and D.Y.H. Pui (1977), "On Unipolar Diffusion Charging of Aerosols in the Continuum Regime", *J. Colloid Interface Sci.*, 58: p. 142.
7. B.Y.H. Liu and D.Y.H. Pui (1974), "Electrical Neutralization of Aerosols", *J. of Aerosol Sci.*, 5: p. 465.
8. B.Y.H. Liu and D.Y.H. Pui (1974), "Equilibrium Bipolar", p. 305.
9. B.Y.H. Liu and D.Y.H. Pui (1974) "A Submicron Aerosol Standard and the Primary, absolute Calibration of the Condensation Nuclei Counter", *J. Colloid Interface Sci.*, 47: p. 155.
10. Heard, M.J., A.C. Wells, and R.D. Wiffen (1970) "A Re-determination of the Diameters of Dow Polystyren Latex Sphers" *Atmos. Environ.* 4: p. 149.
11. Davidson, J.A., and H.S. Haller (1974) "Latex Particle Size Analysis. Part V—Analysis of Errors in Electron Microscopy", *J. Colloid Interface Sci.* 47: p. 459.
12. Dezlic, G., and J.P. Kratochvil (1961) "Determination of Particle Size of Polystyren Latexs by Light Scattering", *J. Colloid Sci.*, 16: p. 561.
13. Davidson, J.A., and E.A. Collins (1972) "Particle Size Analysis. Part IV—Comparative Methods for Polyvinyl Chloride latex.", *J. Colloid Interface Sci.* 40: p. 437.
14. Porstendorfer, J., and J. Heyder (1972) "Size Distribution of Latex Particles", *J. Aerosol Sci.*, 3: p. 141.
15. La Mar, V.K., and I.V. Plesner (1957), *J. Polymer Sci.*, 24: p. 147.
16. Stober, W., and H. Flachsbart (1971) "High resolution Aerodynamic Size Spectrometry of Quasi-Monodisperse latex Spheres with a Spiral Centrifuge", *J. Aerosol Sci.*, 2: p. 103.
17. Raabe, O.G. (1976) "The Generation of Aerosols of Fine Particles" in *Fine Particles: Aerosol Generation, Measurement, Sampling and Analysis*, p. 57, B.Y.H. Liu (ed), Academic Press, Inc., New York.
18. V.A. Marple, B.Y.H. Liu and K.L. Rubow (1978) "A Dust Generator for Laboratory Use", *Ind. Hyg. Assoc. J.*, 39: p. 26.