

응축핵 계수기 (Condensation Nucleus Counters)의 작동원리와 응용

생산기술연구원
(기계기술실용화센터)
박사 안 강 호

1. 개요

응축핵 계수기(CNC)는 광학적 계측기로 측정할 수 없는 매우 작은 입자들을 계측할 수 있는 장비로 100년 이상의 역사를 갖고 있다. 최초의 응축핵 계수기는 1888년 John Aitken¹⁾에 의해 제작되었으며, 대기과학에서 “Aitken Particle”은 CNC로 측정할 수 있는 작은 입자들을 말한다.

일반적으로 CNC로 측정할 수 있는 입자는 약 3mm 보다 큰 입자들이며, 입자농도와 크기를 동시에 측정할 수 있는 광학입자계수기와 달리 입자의 농도만 측정할 수 있다. CNC 모델에 따라 입자측정농도는 다르지만 0.01에서 10^7 개/cm³의 매우 광범위한 측정범위를 갖는다.

2. 작동원리

CNC의 작동원리는 크게 2가지로 구분된다. 가장 오랫동안 사용해 온 팽창형 CNC와 70년대말 80년대 초에 개발된 연속 유동형 CNC가 있다.

팽창형 CNC의 작동원리는 구름의 형성 과정과 유사한 단열팽창 현상을 이용하며, 입자를 포함한 공기를 증기 포화기(humidifying chamber)를 거쳐 포화상태로 만든 후 팽창기(expansion chamber)로 주입시킨 후 공기를 단열 팽창시켜 일반적으

로 과포화도가 4인 상태로 만든다. 단일 팽창과정에서 공기의 온도가 급격히 하락됨으로 증기가 응결되기 시작하며, 이들 증기는 Particle(Nuclei) 및 팽창기 벽에 응결되기 시작한다. 이 응결 과정에서 Particle은 증기의 응축으로 수 μm 정도의 입자로 성장하게 된다. 이들 응축된 입자는 빛의 산란에 의한 방법으로 입자의 농도를 측정하게 된다.

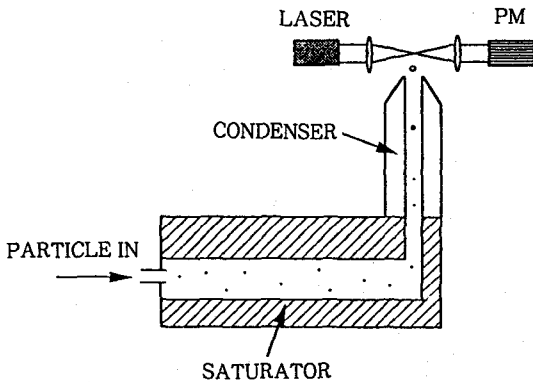


그림 1. Schematic of Condensation Nucleus Counter

이 팽창형 CNC는 측정 기체의 비연속적인 샘플링으로 초미세 입자 크기를 분류할 수 있는 diffusion battery와 결합하여 연구할 수 없는 한계에 부딪히게 되었다. 이 문제를 극복하기 위하여 연속 유동형 CNC가 개발되었다.

이 연속 유동형 CNC는 대기오염 및 입자에 의한 환경오염 측정등 Sub-micron

particle 연구에 매우 중요한 장비로 사용되고 있으며, 최근 반도체 제조 클린룸내의 입자오염 측정에도 이용되기 시작하였다. 이 형태의 CNC 구조는 그림 1에 보여 주고 있듯이 크게 3부분—즉, 포화기, 응축기, 광학측정부 등—으로 나눌 수 있다.

연속 유동형 CNC의 작동원리는 Particle을 포함한 가스가 작동유체(주로 알콜등 working fluid)로 젖은 포화기를 통과하게 된다. 이 포화기는 상온보다 높은 온도를 유지하게 되며 이 곳을 통과한 가스는 증기로 포화되게 된다. 이 포화된 가스는 입자와 함께 상온보다 낮은 온도로 유지되고 있는 응축기로 유입되 과포화상태에 이르러 증기의 응결현상이 일어나게 된다. 이 때 증기의 응결은 기체내에 포함된 일정크기 이상의 초미세입자의 표면에 일어나게 되며, 응축기를 통과하는 동안 초미세입자는 계속 성장을 하게 된다. 이 때, 성장을 할 수 있는 최소 크기의 입자를 Kelvin 입자라 하며 이 보다 작은 입자가 성장을 하기 위해서는 더 높은 과포화 상태를 유지해야만 가능하다. [Ahn²⁾] 이렇게 성장된 입자는 수 μm 크기가 되며 응축기 출구 부분에서 간단한 광학구조에 의해 빛의 산란현상으로 입자의 갯수를 측정할 수 있게 된다.

또 다른 형태의 연속 유동형 CNC로 합류형(Mixing Type)이 있다. [Kousaka³⁾] 이는 낮은 온도의 포화된 공기와 높은 온도

의 포화된 공기를 혼합하여 과포화 상태로 만들며, 이 때 공기중의 입자를 응결 현상이 일어나 큰 입자로 성장하게 되며 이들 입자는 광학계에 의해 쉽게 검출된다.

이들 CNC의 특징으로는 조작이 쉬우며 구조가 간단해 사용이 편리하며, 특별한

calibration을 필요로 하지 않는다. 단, 작동 유체가 광학계로 흘러들어가지 않도록 유의해야 한다.

널리 사용되고 있는 상용 CNC들을 표 1에 각 모델별로 사양을 열거하였다. TSI 3022는 3020의 후속모델로 유량조절이 가

표 1. 상용 CNC

모 델	유 량	최소측정 입경(μm)	최대입자 농도($\#/ \text{cm}^3$)	기 타
TSI 3022	300cc/min	0.01	10^7	일반 연구용
TSI 3025	30cc/min	0.0025	10^5	Ultrafine Particle 연구용
TSI 3760	1.4 l/min	0.014	350	고유량, Cleanroom용
TSI 3761	2.8 l/min	0.02	10^3	APF-175 사용
Kanomax 3851	2.8 l/min	0.01	350	Etylen Glycol 사용
Kanomax 3861	5.6 l/min	0.01	35	Etylen Glycol 사용
RION KC-60	2.8 l/min	0.01	35	Propylene Glycol 사용

능하며 여러 부가기능이 추가되었다. TSI 3025는 초미세입자 연구용으로 개발되었으며 입자를 포함한 기체가 응축기내의 과포화값이 가장 큰 중심축을 따라 흐르도록 고안되었다. TSI 3760은 Cleanroom 오염 측정용으로 개발된 고유량 CNC로 응축기 내에서 기체와의 접촉면적을 넓히기 위해 5개의 분리된 원통관을 통해 흐르도록 고안되었다. TSI 3761 역시 Cleanroom 오염 측정용으로 개발되었으며, 작동유체로 유기화

합물인 n-Butanol 대신 무독무취의 APF-175를 사용하였다. [안⁴⁾] 일본의 Kanomax 와 RION은 Glycol을 작동 유체로 사용하였으며 합류형이다.

CNC의 최소 측정 입경은 회사의 Model마다 약간씩 다르나 $0.01\mu\text{m}$ 내외의 입자에서 50%의 측정효율을 나타낸다. 이들 보다 큰 입자는 100% 측정효율을 보여 주며, 3~ $5\mu\text{m}$ 이상의 입자는 sampling 효율 및 CNC 내부에서의 inertia loss에 의해 100%

이하의 측정 효율을 나타낸다.

CNC 포화기의 작동유체(working fluid)로 사용되는 액체는 다음과 같다.

-n-Butanol : 가장 많이 사용되고, 가장 좋은 작동유체이나 약간의 독성과 악취가 있음.

-Isopropanol : 흡수성이 있으며 장기간 사용시 작동 특성이 떨어지며 액체를 자주 바꿔줘야 함

-Ethanol : 흡수성이 있으며 액체를 자주 바꿔줘야 함

-Diethylene glycol, dipropylene glycol, dibutyl phthalate, hexanol : 주로 합류형 CNC의 작동 유체로 사용

-Inert fluids : 주로 APF-175 나 Fluorocarbon(FC) 계통의 액체로 최근 무

독성, 무공해를 요구하는 곳의 측정용 CNC의 작동 유체로 사용되며, CFC와 달리 오존층 파괴 물질이 아님.

-Water : 좋은 작동 유체중의 하나이나 소수성 입자의 계측시 문제가 있음

3. Sub-micron Particle 분포측정

CNC의 특징으로 일정크기 이상의 입자 농도는 정확히 측정할 수 있으나 입자의 크기를 잴 수 없는 것이 단점이었다. 그러나 브라운 확산(Brownian Diffusion)을 이용해 Sub-micron 크기의 입자를 분류할 수 있는 diffusion battery를 CNC와 같이 연결해 사용하면 Sub-micron 입자 분포를 알 수 있다. (그림 2) 이 같은 방법은 입자의 분포가

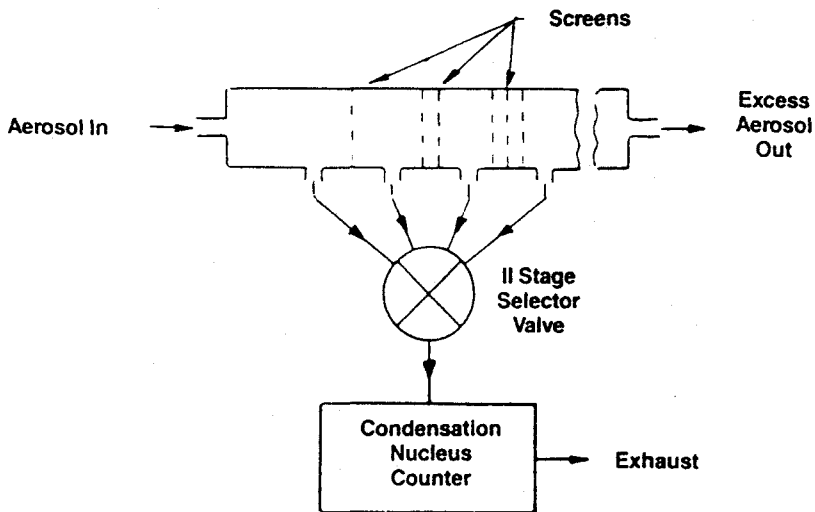


그림 2. Schematic Diagram of a Screen Battery Assembly and Ultra-fine Particle Measurement with CNC.

넓은 system에 주로 사용되며 재연성이나 정확성이 떨어지는 단점이 있다.

CNC와 연결해 Sub-micron 입자 분포를 구할 수 있는 또 다른 방법으로 Keady, et al. [5]의 DMPS(differential mobility particle sizer)를 들 수 있다. 이 방법은

그림 3에 보여주듯이 DMA(Differential Mobility Analyser)를 이용해 Sub-micron 크기의 입자를 분리하고 이들 입자 농도를 CNC로 측정함으로써 Sub-micron 크기의 입자 분포를 분석하는 system이다. DMA에 적용되는 전압은 computer에 의해 자동조

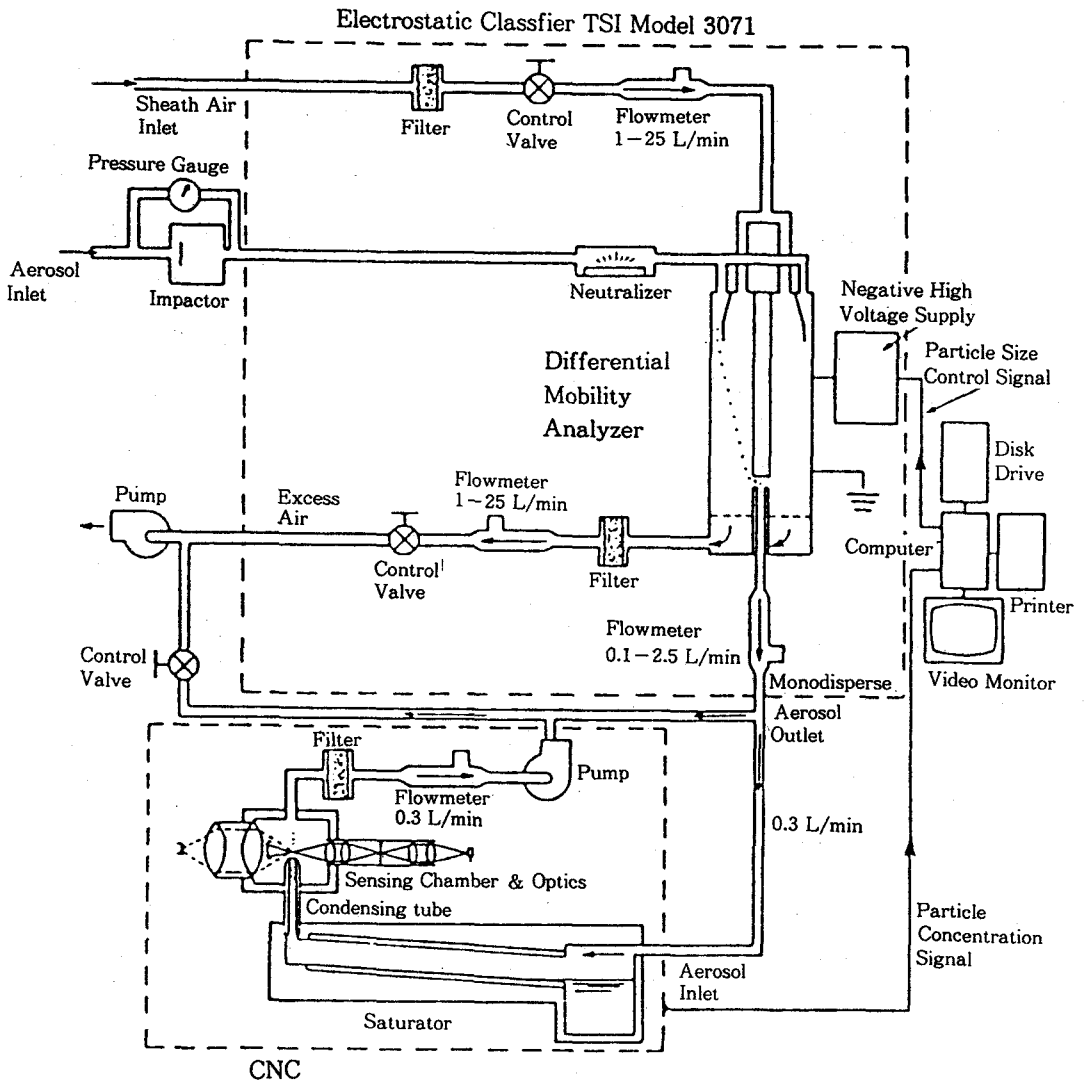


그림 3. Schematic Diagram of a Differential Mobility Particle Sizer (DMPS).

절되어 원하는 크기의 Sub-micron 입자를 추출해 내면 CNC에 의해 입자의 농도를 측정한다. 이 system은 scanning 시간이 20분 이상 걸리며 class 300 이하의 환경에서는 측정이 불가능한 것으로 알려져 있다. [Donovan et al.⁶⁾]

- 참고 문헌 -

1. Aitken, J., 1988, "On the Number of Dust Particles in the Atmosphere," Proc. Royal Soc. Edinburgh, p 35.
2. Ahn, Kang-Ho and B. Y. H. Liu, 1990, "Particle Activation and Droplet Growth Processes in Condensation Nucleus Counter, I. Theoretical Background, II. Experiment," J. Aerosol Sci. Vol. 21, p 249.
3. Kousaka, Y., To Niida, K. Okuyama, and H. Tanaka, 1982, "Development of a mixing type Condensation Nucleus Counter," J. Aerosol Sci., Vol. 13, p 231.
4. 안강호, 1991, "응축핵 계수기내의 응축핵의 성장현상," 1991 기계학회 추계 학술대회 초록.
5. Keady, P. B., F. R. Quant, and G. J. Sem, 1983, "Differential Mobility Particle Sizer : A New Instrument for High-Resolution Aerosol Size Distribution Measurement Below 1 μ m," TSI Quarterly, 9(2) : p 3.
6. Donovan, R. P., B. R. Locke, C. M. Osburn, and A. L. Caviness, 1985, "Ultrafine Aerosol Particles in Semiconductor Clean Rooms," J. Electrochemical Society, 132(11) : p 2730.

뉴스

-내년도 과기처 예산 3천9백억-

과기처는 내년도 과학 기술기반 강화를 위한 정부예산을 올해보다 11.7% 늘어난 3천9백86억원으로 확정, 핵심전략기술개발을 위한 특정연구개발사업에 1천3백억원, 과학기술연구원등 12개 정부출연기관에 2천3백24억원을 배정했다.

과기처는 내년에 과학기술자들에게 문화공간 및 편의시설을 제공하기 위해 서울과 대덕에 66억원을 투입, 과학기술진흥 센터와 과학기술문화센터를 건립하는 한편 해외기술정보수집을 강화하기 위해 시스템공학센터 전기연구소 등 4개연구소의 해외주재관을 일본에 상주토록 하고 우수과학 기술인에 대한 과학기술 연금제도를 도입, 10명을 선정해서 매월 1인당 2백만원씩을 지급키로 했다.

과기처는 또 내년부터 소재특성평가센터와 안전기술원 등을 건설하고 정부출연연구기관의 연구장비를 대폭 확충키로 했다.