

액적 발생기의 종류 및 액적 발생 원리에 대한 고찰

박봉엽* · 한재섭* · 김선진** · 김 유*

A Survey on the Droplet Generators and Principle of Droplet Generation

Bong-Yeop Park* · Jae-Seob Han* · Seon-Jin Kim** · Yoo Kim*

ABSTRACT

Most droplet generators are based on the Rayleigh's theory of droplet breakup, and various kind of droplet generation devices have been designed in accordance with vibrating method of capillary liquid column. At present, VOAG(Vibrating Orifice Monodisperse Aerosol Generator) is used to generate primary aerosol standards. For the combustion experiments with isolated single droplet, it is found that dripping method or separating method of suspended drop at an end of filament are more effective. Single drops can be separated from continuous streams of droplets by controlling electric charge.

초 록

액적 발생기는 Rayleigh의 액적 분열 이론에 기초한 액적 발생기가 주류를 이루고 있으며, 모세관 액주의 진동 방법에 따라 여러가지 액적 발생기가 고안되었다. 현재는 액적 발생의 표준장비로 VOAG(Vibrating Orifice Monodisperse Aerosol Generator)가 사용되고 있다. 단일 액적을 사용한 연소실험에는 적하방법이나 필라멘트에 매달린 액적을 분리하여 사용하는 방법이 더 효과적임을 알았다. 단일 액적을 분리하는 방법은 액적을 대전시켜 액적 흐름에서 단일 액적을 분리하는 방법을 사용한다.

1. 서 론

에어로졸에 대한 연구는 1930년대 이래로 자동차 내연기관의 발달과 더불어 활성화되었으며 특히 연료의 미립화 기술은 연소 시스템 개발의 측면에서 매우 중요한 연구 과제가 되어왔다. 1970년대부터는 대기 공기오염에 대한 연구를 위하여 에어로졸 연구가 수행되어왔다. 1970년대 후반부터는 에어로졸 관련 측정기술의 현저한 발달과 수치해법의 개발로 에어로졸에 대한

연구가 크게 진척되었다.¹⁾ 이러한 기술의 발달과 더불어 정밀한 액적 발생기의 필요성이 대두되었다. 특히 반도체 산업의 발달로 반도체 제조에 필요한 청정실과 고순도 기체 유동의 오염 정도를 측정하는데 표준 측정장비로 액적을 정확히 알 수 있는 단일분포 에어로졸 발생기가 요구되었다.²⁾ 액적 발생기는 액적의 역학적 연구는 물론이고 연소, 공력학 분야 및 기상학 분야에도 이용되기 시작하였으며, 얇은 벽으로 극소량의 액체나 고체를 싸거나 또는 서로 섞이지

* 충남대학교 기계공학과(Chungnam National University, Dept. of Mechanical Eng.)

** 청양대학 소방안전관리과(Chong Yarg Lettage)

않는 유체 속에 액적을 부유시키기 위한 극소 캡슐화 기술에도 응용되었다.³⁾ 또 물방울의 충돌에 의한 토양 침식 연구,⁴⁾ 구름 입자의 생성 연구, 생태학에서는 식물에 작용하는 살충제 액적의 거동 연구, 에어로졸 물리학에서는 시료 채취 및 측정장비의 교정, 잉크 젯트 프린터, 의학에서는 호흡기 보호장비의 효율 평가 등에 사용되었다.⁵⁾ 분포 액적은 수직 충격파 관의 산화제 속에 액적을 자유 낙하시키며 이 혼합물에 폭발파를 통과시켜 2-Phase Detonation에 대한 연구에도 이용되었다.⁶⁾

본 고에서는 Rayleigh의 액적 분열 이론과 그동안 개발된 액적 발생기의 종류 및 액적 발생의 원리에 관한 문헌 조사 결과를 정리하였다. 특히 균일분포 단일 액적을 사용하여야 할 실험에 필요한 액적 발생기를 중점적으로 조사하여 이 분야에서 실험하고자 하는 연구자의 관점에서 살펴보았다.

II. 액적 발생 이론

과포화 기체의 응축 원리에 기초를 둔 에어로졸 발생기가 1949년과 50년에 개발되었고, 1952년에는 정전 분부에 기초를 둔 에어로졸 발생기가 개발되었다. 그러나 균일한 크기의 액적을 만들지는 못하였다.⁹⁾ 균일한 크기의 액적 흐름을 만드는 진동 모세관 장치는 대부분 모세관 분류의 불안정성에 대한 Rayleigh의 이론과 액체 분류의 분열에 대한 1833년의 Savart 실험 관찰에 근거를 두고 있다. 파동이 액체 분류에 미치는 영향을 정량적으로 처음으로 기술한 사람은 Rayleigh이다. Rayleigh 이래 많은 연구가 이루어졌으며 이론과 관계되어 많은 실험이 수행되었다. 분류 분열길기와 유동에서 가장 빠른 교란을 만드는 진동수를 결정하는 문제를 많은 문헌에서 언급하여왔다. Rayleigh는 최대 불안정에 대한 진동수, 즉 최적 진동수, f 와 분류 속도 u_j 및 분류 직경 d_j 와의 관계를 다음과 같이 표현하였다.

$$f = \frac{u_j}{4.508 d_j} \quad (1)$$

분류가 기계적으로 이 주파수로 교란되면 균

일한 액적이 생성된다. 면균일한 Schneider와 Hendricks[11]는 파장 λ 가 $3.5 d_j < \lambda < 7 d_j$ 면 균일한 크기의 액적이 만들어진다고 하였다. 액적 크기는 주파수에 의해 지배되므로 질량 보존에 의해서 쉽게 알 수 있으며 액적 질량은 액주 분류의 파장 길이와 같아

$$\pi(d_j/2)^2 \lambda = 4/3\pi(D/2)^3 \quad \text{이므로 다음과 같다.} \quad (17)$$

$$\frac{D}{d_j} = \left(\frac{1.5\lambda}{d_j} \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$\frac{\lambda}{D} = \left(\frac{\lambda^2}{1.5 d_j^2} \right)^{1/3} \quad (3)$$

식(2)와 (3)으로 부터 최적 진동수에서 액적의 직경은 다음과 같이 표현된다.

$$D/d_j = 1.89 \quad (4)$$

$$\lambda/D = 2.38 \quad (5)$$

Rayleigh 이론은 비점성 액체의 정지된 모세관 액주에 효과적으로 적용되며 분류속도 10 m/sec 이하에서도 잘 맞는다. 액체가 작은 구멍이나 모세관으로 강제로 주입되면 액체는 표면장력으로 인하여 출구면에 작은 액적으로 붙어있다. 액적이 커져서 표면장력을 이기게 되면 표면에서 분리되어 떨어진다. 이런 방식으로 생성된 액적은 크기가 크다. 압력이 증가하면 분류의 직경이 모세관 출구와 같아지는 압력이 존재한다. 분류는 배출된 후 짧은 거리 내에서 불균일한 크기의 액적으로 분열된다. 분류를 Rayleigh 이론과 같은 진동수로 출구면에서 진동시키면 액적은 균일하게 된다. 또 모세관에서 배출되는 분류 속도는 액체의 표면장력, 밀도 및 분류 직경에 지배되며 다음과 같이 표현되는 모세관 분류의 최소속도가 있다고 하였다.

$$u_j^2 \geq \frac{8\sigma}{\rho d_j} \quad (6)$$

그러나 실험결과 직경 0.15~0.5 mm인 모세관에서는 실제속도가 이 관계식의 값보다 25~30% 정도 낮았다¹⁰⁾. 최소속도에서 최적 진동수를 구하면 식(1)과 (6)로부터 다음 결과를 얻을 수 있다.

$$f = 0.627 \left(\frac{\sigma}{\rho d_j^3} \right)^{1/2} \quad (7)$$

직경이 서로 다른 액적을 동시에 만들 때는 식 (4)로부터 직경이 서로 다른 두 개의 액적 흐름을 만드는 분류 크기를 구할 수 있지만 각 분류에 대한 최적 진동수는 다르다. 따라서 진동수를 동조시키는 방법이 포함되어야 한다. 모세관 끝에서 분류를 만들어 내는데 필요한 최소속도와 난류가 시작되는 최대속도가 사용 가능한 속도이다. 결과적으로 이 방법으로는 반경이 아주 다른 액적을 만들 수 없다. 동조 문제의 해결방법으로 각 흐름을 변조하는데 조화 주파수를 사용하는 것이다. 두 액적을 분리하기 위해 액적에 높은 전하를 대전시킨다. 액적에 대전된 전하의 크기와 부호는 분류에 인가된 전압과 관계가 있고 원하는 값으로 조절하여 액적을 분리한다.¹⁰⁾

액적의 역학을 연구할 때는 공력학적 영향이 작아야 한다. 대부분의 실험에서 액적은 단일 정현파 교란이나 조화함수가 더해진 정현파 교란에 의해 대기 중에 분사되어 만들어진다. 최근까지 유동이 분열되어 생성된 액적의 속도 균일성에 대한 연구는 없었다.⁸⁾ 그 이유는 대부분의 연구에서는 모세관에서 유동을 대기 또는 그 이상의 압력 속으로 분사하였고, 이런 환경 속에서 만들어진 액적은 노즐 특성보다는 공력학에 의해 지배되므로 자세한 액적 역학의 연구가 불가능하였기 때문이다. 공력학적 영향을 줄이기 위하여 3×10^{-5} Torr의 진공 상태에서 액적을 만들기도 하였다.^{7,8)}

III. 액적 발생기 종류와 원리

(1) 진동하는 모세관에서 분출되는 비점성 액체 원주 또는 분류는 교란 파장이 액주 두께길이보다 크면 축방향의 대칭성 교란에 불안정하다는 Rayleigh의 이론에 기초를 둔 방법이다. Schneider와 Hendricks^{11,17)}는 기계적 교란에 압전 변환기(Piezoelectric Transducer)를 사용하였다. 변환기의 온도금 표면에 교류전류를 가하면 진동하여 변환기의 두께가 변한다. 이 두께의 변화를 모세관에 전달, 모세관이 진동한다. 모세관에 흐르는 유체의 속도와 모세관 내경을 측정하여 분류속도를 계산한다. 분류속도는 교란 파장에 주파수를 곱한 것과 같으므로 교란 파장을 구할 수 있다. 단일 액적을 만들 때는 모세관과

는 절연된 속이 빈 원통형 전극을 모세관 끝에 동일 축상에 설치한다. 이 대전전극으로부터 대전된 액주는 분류의 분열에 의해 형성된 모든 액적도 균일하게 대전된다. 대전 전극에 설치된 편향판에 의해서 단일 액적을 포집할 수 있다. (그림 1)

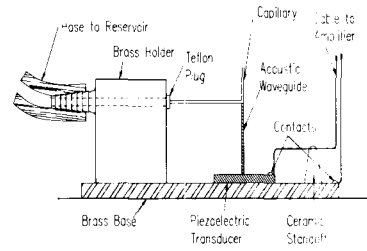


Fig. 1 Apparatus used to launch capillary waves on a jet of liquid

그림 2는 Dabora가 만든 장치의 개략도이다. 공기방울 제거장치가 달린 발생기 챔버로 액체를 가압하여 주입한다. 발생기는 아랫부분에 원하는 크기의 모세관이 조립되어 있는 원통형 챔버(내경 4.3 cm, 길이 2cm)로 구성되어 있다. 분출되는 분류의 속도를 균일하게 하기 위해서 같은 길이의 주사바늘을 사용한다. 바늘의 길이는 판 두께보다 길고 양쪽으로 돌출되어 있다. 외부 돌출부는 바늘 끝에서 판 밑으로 흘러들어 불규칙적으로 적하되는 것을 방지하기 위해서이다. 액체 분류를 진동시키는 방법은 챔버 전체를 진동시키는 방법과 원통형 챔버 위판에 두께 0.076 mm 이하의 황동 박판을 달아 진동기나 스피커 코일로 진동시키는 방법을 사용한다.

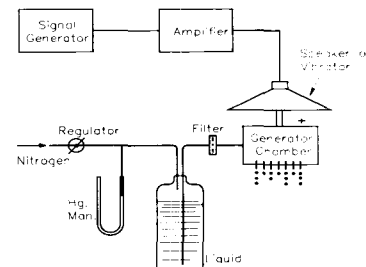


Fig. 2 Schematic of spray generator system after Dabora

Adam과 동료들¹²⁾은 모세관을 진동시키는 방법으로 오디오 진동기를 사용하였다. 액적 발생기는 Plexiglas로 만들었으며 크기는 6.25×5×1.9 cm 이다.(그림 3)

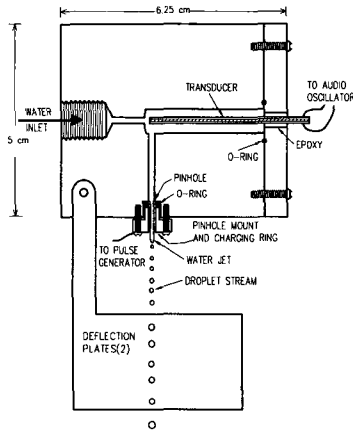


Fig. 3 Droplet generator by audio oscillator

물은 입구(Inlet)에서 들어와 음향 여기실 (Acoustical excitation chamber)을 거쳐 분류가 만들어지는 출구로 내려간다. 진동기로는 길이 4.5, 폭 0.159, 두께 0.061 cm의 PZT bimorph 트랜스듀서를 사용하였으며 진동을 유체에 잘 전달할 수 있도록 벽에 외팔보로 장착하였다. 트랜스듀서는 오디오 진동기의 신호에 의해서 진동한다. 바늘구멍 조립체는 장치의 아래쪽에 조립되어 있으며 바늘 직경은 1 μm 이하에서 1 mm 이상까지 다양하게 쓸 수 있으며 액적의 크기는 12 μm ~ 2 mm로 물 탱크의 압력, 바늘 구멍 직경 및 트랜스듀서의 진동수에 따라 쉽게 변화시킬 수 있다.

(2) Rayleigh 분열을 이용한 방법 중의 하나로 얇은 박판에 가공된 오리피스를 이용하는 방법이다.^{2),8),16)} VOAG(Vibrating Orifice Monodisperse Aerosol Generator)는 액체 공급장치, 액적 발생기, 액적 분산장치 및 에어로졸 유동 장치의 4개의 주요 장치로 구성되어 있다. 액적 발생기는 바닥에 구멍이 뚫려있는 직경 1.16인치의 프렌지가 달린 컵으로 구성되어 있고, 컵 바닥에 가공된 홈에 외경 0.375인치 오리피스 디스크, 테프론 오링이 강철 컵에 조립되어 있

다. 컵 프렌지에는 양쪽이 은도금된 링 모양의 압전 세라믹(Piezoelectric Ceramic)이 고정되어 있어서 이것이 교류 전압에 의해서 진동하여 액적을 발생한다. 깨끗한 공기를 불어넣어 액적 흐름을 희석시켜 액적이 충돌하는 것을 방지한다.

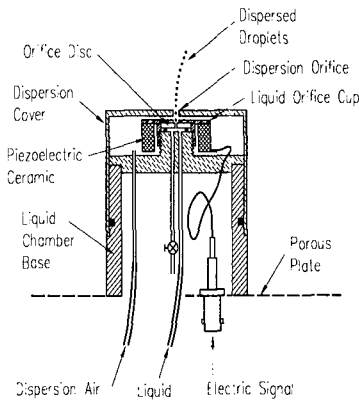


Fig. 4 Schematic diagram of the Vibrating Orifice Aerosol Generator

사용된 오리피스의 직경은 2.96~22.1 μm, 액경은 400 μm 이하, 기하학적 표준편차는 1.03 이하로 매우 균일성이 좋아 에어로졸의 크기와 농도를 정확하게 계산할 수 있기 때문에 에어로졸 표준 장비로 사용된다.(그림 4 참조)

작은 오리피스를 통과하는 유체에 압력 요동을 가하여 액적을 만드는 방법의 또 다른 방법은 큰 속도로 노즐에서 배출되는 가느다란 액체 분류는 표면장력의 영향으로 인하여 자발적으로 액적으로 분열되는 현상을 이용한 것이다. 이런 분열 방식을 "Zertropfen" 이라 한다.¹³⁾ 분열된 액적은 충돌과 유착으로 다중분포 에어로졸로 바뀐다. 분류속도를 조절하여 액적의 크기, 간격 및 속도를 조절, 모든 액적을 같은 크기로 만들 수 있다. Strom¹³⁾은 분류를 교란시키는 방법으로 얇은 강철 멤브레인을 이용하였다. 멤브레인과 디스크 전극사이에 전압을 인가하면 한 개는 팽창하고 한 개는 수축하도록 구성되어 있다. 멤브레인 중앙에 노즐이 압착되어 있어 인가된 교류 전압에 의해 노즐도 진동한다. 이 진동이 분류에 전달되어 액적의 크기 및 발생주기가 조절된다.(그림 5)

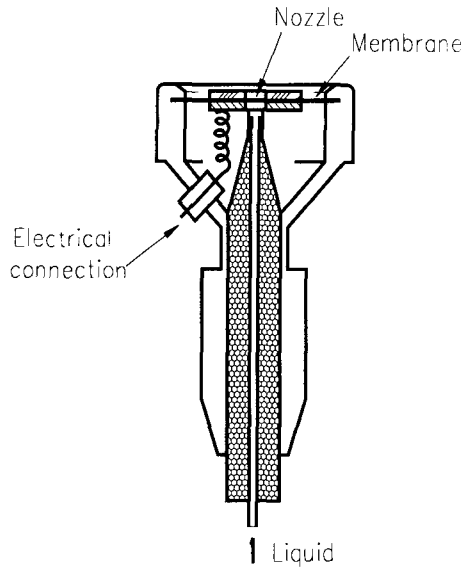


Fig. 5 The holder and liquid feed arrangement for membrane and nozzle

분류 직경, 분류 속도, 변조 주파수는 다음관계가 성립한다

$$u_j = \pi\sqrt{2} d_j f \quad (8)$$

(3) 모세관 끝에 간헐적으로 공기를 흘려서 물 방울을 분출시키는 방법으로 Samuels와 Sparks³⁾은 주사기 펌프에 의해 액체가 흐르는 모세관(주사바늘)과 이 주위에 동심으로 둘러싸인 관으로 공기를 배출하여 액적을 만드는 장치를 만들었다. 그림 6의 A로 액체가 주입되고, 일정하게 조절된 공기는 E로 공급된다. 액체와 공기가 일정하게 흐른다고 가정하면 균일한 액적을 만들 수 있다.

액적들의 상호 충돌을 방지하고 크기를 일정하게 조절하기 위해 공기 흐름에 박동을 가한다.¹⁵⁾ 이 장치로 만든 액적은 직경 0.3 ~ 1.8 mm, 표준편차는 ±3% 이내로 균일하지만, 정교한 기계유동과 전자장치가 필요하다.

(4) 적하방법: 수직 하방의 모세관 끝에 매달린 액체의 표면장력과 대전된 전하량에 의한 액적 발생 방법이다.

액체 저수조에 튜브로 연결된 수직 모세관 끝에 매달린 액체 방울의 표면장력보다 액체에 걸린 압력이 크면 방울의 무게가 점차 커져 모세관 가장자리의 표면장력을 이기게 되어 방울은 모세관에서 낙하한다. 모세관과 액체가 전도체이

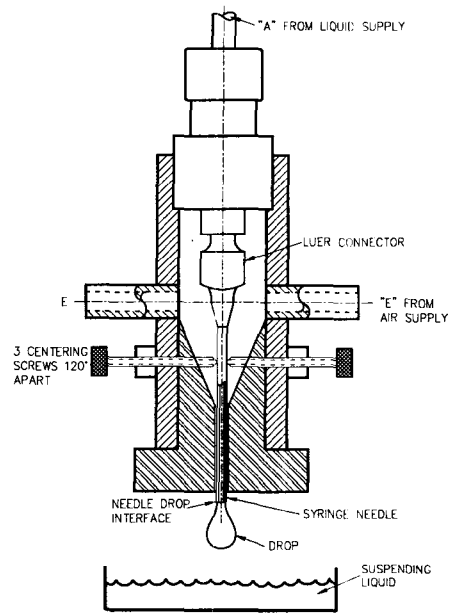


Fig. 6 Dual pulsed droplet apparatus

면 모세관 바로 아래 중앙에 둥근 관 형태의 전극을 달아 모세관 끝에 달린 방울을 충전시킨다. 모세관 끝 부근의 강한 전기장으로 인하여 충전된 방울은 아래 방향으로 힘을 받게되어 분리에 필요한 방울의 무게가 감소한다. 인가되는 직류 전압을 증가시키면 액적의 크기는 작아지고 주기는 증가한다. 이런 방법으로 모세관 직경의 절반이하의 크기를 갖는 액적을 만들 수 있다. 이 방법을 적하방법이라 한다.

Raghupathy와 Sample⁴⁾이 만든 액적 발생기의 개략도는 그림 7이다. 강철 주사바늘, 플라스틱 주사기 및 액체 저수조로 구성된 액체 공급 장치는 서로 절연되어있다. 저수조의 높이를 조절하여 유속을 변화시키고 유속을 방출 주기로 나누면 액적 질량 즉 액경을 구할 수 있다. 인가하는 전압과 주파수를 변화시켜 액경을 변화시킨다.

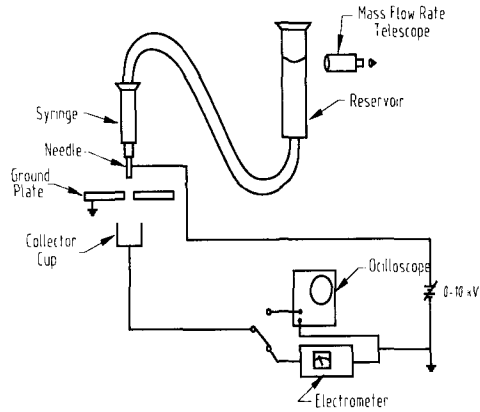


Fig. 7 Apparatus for uniform liquid drops produced by electrically induced dripping

(5) 액체가 담긴 용기 벽을 타격하면 이 충격에 의해 액체 표면에서 액적이 발생한다. 이와 같은 현상을 이용하여 Jonsson⁵⁾은 모세관을 두드려서 균일한 액적을 만들었다. 작고 벽이 얇은 금속 또는 유리관을 그림 8과 같이 탱크에 연결하면 모세관 현상에 의해 액체가 상승한 후 평형을 이룬다. 이 모세관 벽을 두드리면 액적이 배출되고 모세관 현상에 의해 액체는 다시 보충된다. 두드리는 힘과 위치를 변화시켜 액적의 크기와 생성속도를 변화시킨다.

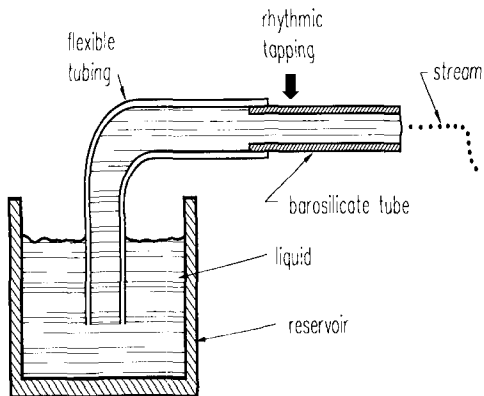


Fig. 8 Schematic diagram of droplet producing arrangement by tapping

(6) 그밖에 사용되는 방법으로는 유체에서 철사를 빨리 잡아당기면 표면으로부터 가느다란 유체선이 만들어 지고, 이 선이 어떤 길이에 도달하면 끊어져 액적이 되는 현상을 이용한 방법¹⁴⁾과, 미세 입자의 안개를 만들어 내는 초음파 방법, 유리 모세관 속의 액체에 5 kV 이상의 고전압을 가하여 전기가 대전된 액적이 모세관 끝에서 분출하는 전기 분무 방법 등이 있다.

IV. 결 론

용도에 따라서 다르지만 일반적으로 액적 발생기는 작고, 신뢰할 수 있어야 하고, 쉽게 설치할 수 있어야 한다.¹²⁾ 또 액적 크기의 분포, 발생 속도, 발생의 안정성, 액적 크기의 조절이 용이하고, 발생 속도와 액적이 운반하는 전하량의 조절이 가능하여야 액적을 분리하여 실험에 이용하기가 용이하다.⁵⁾ 에어로졸 역학, 단일분포 액적 흐름 및 분무역학 등에는 Rayleigh 분열을 이용한 액적 발생장치를 사용하고 있고, VOAG는 정밀한 전자장치를 부착하여 상품화되어 있으며²⁰⁾ 이장치를 이용한 많은 액적 연소실험이 수행되었다²¹⁾. 단일 액적의 거동, 증발이나 연소 등의 연구에는 적하방법이나,¹⁹⁾ 액체 속에서 표면 방향으로 가느다란 필라멘트를 빠르게 잡아당기면 관성과 중력이 부착력 보다 커서 액적이 발생하는 장치를 사용한다.¹⁸⁾ 특히 단일 액적이거나 단일 액적 흐름을 분리하여 액적의 거동을 연구할 경우에는 액적 입자에 전하를 가하여 대전시켜 분리하는 방법을 일반적으로 사용한다.^{10),11),12),17)}

참 고 문 헌

- 1) 이상용, 액체의 미립화, 민음사, 1996
- 2) Pui,D.Y.H., and Liu,B.Y.H., Advances in Instrumentation for Atmospheric Aerosol Measurement, TSI Journal of Particle Instrumentation, Vol. 4, No. 2, pp. 3-20 (1989)
- 3) Samuels,W.E., and Sparks,R.E., Fluidropper-A Device for Forming Highly Uniform Drops,

- The Review of Scientific Instruments, Vol. 44, No. 2, pp. 132-134(1973)
- 4) Raghupathy,B., and Sample,S.B., A New Apparatus for the Production of Uniform Liquid Drops, The Review of Scientific Instruments, Vol. 41, No. 4, pp. 645-647 (1970)
 - 5) Jonsson,H., and Vonnegut,B., Technique for producing uniform small droplets by capillary waves excited in a small meniscus, The Review of Scientific Instruments, Vol. 53, No. 12, pp. 1915-1919(1982)
 - 6) Pierce,T.H., Production of Polydisperse Sprays, The Review of Scientific Instruments, Vol. 42, No. 11, pp. 1648-1649(1971)
 - 7) Orme,M., On the genesis of droplet stream microspeed dispersions, Physics of Fluids A vol. 3 pp. 2936-2947(1991)
 - 8) Chin,L.P., LaRose,P.G., Tankin,R.S., Stutrud, J., and Switzer,G., Droplet distributions from the breakup of a cylindrical liquid jet, Physics of Fluids A, vol 3, pp. 1897-1906(1991)
 - 9) Dabora,E.K., Production of Monodisperse Sprays, The Review of Scientific Instruments, Vol. 38, No. 4, pp. 502-506(1967)
 - 10) Abbot,C.E., Production of Isolated Pairs of Water Drops Having Unequal Radii, The Review of Scientific Instruments, Vol. 40, No. 9, pp. 1227-1230(1969)
 - 11) Schneider,J.M., and Hendricks,C.D., Source of Uniform-Sized Liquid Droplets, The Review of Scientific Instruments, Vol. 35, No. 10, pp. 1349-1350(1964)
 - 12) Adam, J.R., Cataeo, R., and Semonin, R.G., The Production of Equal and Unequal Size Droplet Pairs, The Review of Scientific Instruments, Vol. 42, No. 12, pp. 1847-1849(1971)
 - 13) Strom,L., The Generation of Monodisperse Aerosols by Means of a Disintegrated Jet of Liquid, The Review of Scientific Instruments, Vol. 40, No. 6, pp. 778-782 (1969)
 - 14) Abbott,C.E., and Cannon,T.W., A Droplet Generator with Electronic Control Size, Production Rate and Charge, The Review of Scientific Instruments, Vol. 34, No. 9, pp. 1313-1317(1972)
 - 15) Reil,K., and Hallet,J., An Apparatus for the Production of Uniform Sized Water Drops, at Desired Time Intervals, The Review of Scientific Instruments, Vol. 40, No. 6, pp. 533-534(1969)
 - 16) Berglund,R.N., and Liu,B.Y.H., Geretation of Monodisperse Aerosol Standards, Environmental Science & Technology, vol. 7, no. 2, pp. 147-153(1973)
 - 17) Schneider,J.M., Lindblad, N.R., Hendricks, Jr.,C.D., and Crowley, J.M., Stability of an Electrified Liquid Jet, Journal of Applied Physics, vol.38, no.6, pp. 2599-2605(1967)
 - 18) Okajima,S., and Kumagai,S., Further investigations of combustion of free drops in a freely falling chamber including moving droplets, Fiteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp.401-407(1975)
 - 19) Renksizbulut,M., and Yuen,M.C., Experimental study of droplet evaporation in a high-temperature air stream, Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, vol. 105, pp. 384-388(1983)
 - 20) <http://www.tsi.com/particle/product/pisheets/3450/3450.html>
 - 21) Green,G.J., Takahashi,F., Walsh,D.E. and Dryer,F.L., Aerodynamic device for generating mono-disperse fuel droplets, The Review of Scientific Instruments, Vol. 60, No. 4, pp. 646-652(1989)