



Spray Analysis  
and Research Services  
A Service of *Spraying Systems Co.*

# Spray Technology Reference Guide: Understanding Drop Size



스프레이 기술 참조 가이드:  
입자경의 이해

By *Rudolf J. Schick*  
*Spraying Systems Co.*

## 목차(Table of Contents)

서론.....	3
섹션 1 — 도입.....	4
미세분무(Atomization)란?.....	4
입자경 이해 .....	4
섹션 2 — 샘플링 기법 .....	5
공간 기법(Spatial technique).....	5
유속 기법(Flux technique).....	5
섹션 3 — 입자경 분석기 .....	7
광학 영상 분석기(Optical imaging analyzers).....	7
레이저 회절 분석기(Laser diffraction analyzers).....	8
광학 어레이 프로브(Optical array probes).....	9
위상 도플러 입자 분석기(PDPA).....	10
섹션 4 — 통계.....	12
로신-램러(Rosin-Rammler) 분포 함수.....	12
ASTM® 표준 E799-03.....	12
로그 정규분포.....	13
섹션 5 — 일반 용어.....	15
섹션 6 — 입자 모집단 관련 용어.....	16
섹션 7 — 입자경에 영향을 미치는 요소.....	17
섹션 8 — 입자경 데이터 양식.....	23
섹션 9 — 입자경 데이터 사용에 대한 실제적 고려 사항.....	26
섹션 10 — 참조.....	31
조직(Organizations).....	32
추천 문서(Suggested reading).....	33



## 서론(Preface)

입자경 정보의 중요성은 지난 10여년 동안 크게 증가했습니다. 증발 냉각, 가스 조절, 화재 진압, 스프레이 건조 및 농업용 분사와 같은 많은 스프레이 어플리케이션이 효과적인 사용을 위해 이 정보를 이용하고 있습니다. 점차 엔지니어들이 기본 미세분무 프로세스와 평가 방식을 이해하는 것이 중요해지고 있습니다.

스프레이 응용분야가 더욱 정교해지면서 미세분무의 과학과 기술이 획기적으로 발전했습니다. 스프레이 분석과 스프레이 특성 장비에서 큰 발전이 이루어졌습니다. ASTM®, Institute for Liquid Atomization and Spray Systems(ILASS) 및 ISO 같은 연구 및 규제 조직이 미세분무 연구 및 기술 발전에 기여했습니다. 이러한 노력은 많은 회의를 진행하는 과정에서, 그리고 입자경 관련 표준 제정을 통해 문서화되었습니다.

본 책자는 엔지니어에게 입자경과 관련 문제의 실용적 지식을 제공하도록 구성되었습니다. 여기에서는 미세분무에 대한 간단한 소개부터 시작하며 입자경 샘플링 기법(데이터 수집에 사용할 수 있는 방법)과 입자경 분석기(데이터 기록에 사용할 수 있는 방법)에 대한 섹션이 이어집니다. 섹션 4, 5 및 6에서는 입자경 데이터 분석에 사용되는 통계와 용어를 설명합니다. 여러 입자경 분포 함수와 입자경 평균 지름 조건이 정의되고 논의됩니다. 입자경 분포에 영향을 미치는 요소는 섹션 7에서 설명합니다. 섹션 8에서는 그래픽과 테이블 같은 입자경 데이터의 여러 가지 형식과 이 데이터를 사용하는 방법을 검토합니다.

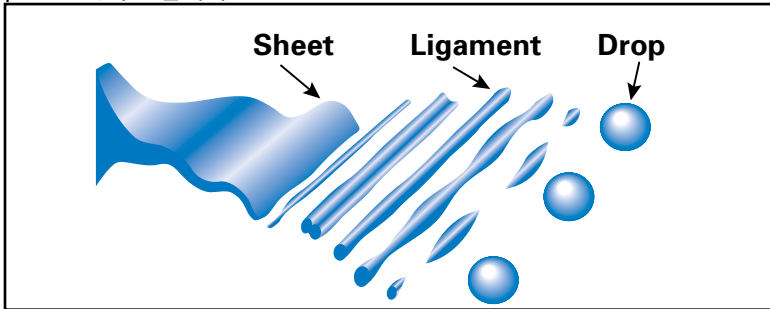
섹션 9에서는 입자경 데이터를 평가할 때 고려할 실제적인 고려 사항에 대해 설명합니다. 이 섹션에서는 보고서를 검토할 때 혼동을 줄이기 위한 데이터 해석의 다양한 측면을 검토합니다. 마지막으로, 섹션 10은 참조 자료 목록, 추천 문서 및 입자경 관련 조직에 대한 정보를 제공합니다.

## 섹션 1 — 도입(Introduction)

정확한 입자 크기 정보는 스프레이 노즐 작업의 전반적인 효과에 중요한 요소입니다. 입자 크기는 가스 냉각, 가스 컨디셔닝, 화재 진압, 스프레이 건조, 정제 코팅, 농업용 스프레이 등과 같은 어플리케이션에서 특히 중요합니다. 입자 크기는 미세분무의 결과입니다.

### 미세분무(Atomization)란?

입자를 생성하는 과정을 미세분무라고 합니다. 미세분무의 과정은 액체를 노즐로 통과시키는 것으로 시작합니다. 노즐의 기하학적 구조를 따라 액체의 잠재적 에너지(일류체 노즐에 대한 액체 압력 또는 이류체 노즐에 대한 액체와 공기 압력으로 측정)는 액체가 작은 리거먼트(ligaments)로 나타나도록 합니다. 이러한 리거먼트는 매우 작은 "조각"으로 더욱 쪼개지는데, 이것을 입자(drops), 입자경(droplets) 또는 액체 입자(liquid particles)라고 합니다.



각 스프레이는 다양한 입자 크기 범위를 제공하며, 이 범위를 입자경 분포라고 합니다. 간단히 말해, 이 과정은 액체가 오리피스에서 나올 때 부서지는 것으로 설명할 수 있습니다. 다양한 스프레이 노즐에는 다른 모양의 오리피스가 있으며, 중공원형, 원형, 부채꼴 스프레이 등과 같은 다양한 스프레이 패턴을 생성합니다. 입자경 분포는 노즐의 종류에 따라 달라지며, 종류마다 큰 차이가 있습니다.

액체 특성, 노즐 용량, 분무 압력 및 스프레이 각도 같은 기타 요인들도 입자 크기에 영향을 미칠 수 있습니다.

### 입자경의 이해

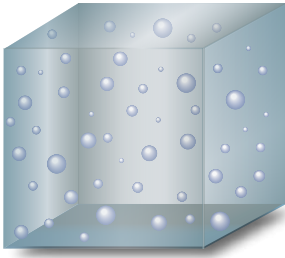
입자경 데이터를 정확하게 평가하고 이해하려면 노즐 종류, 압력, 용량, 액체 특성 및 스프레이 각도 같은 모든 주요 변수를 고려해야 합니다. 입자경 테스트 방법도 완벽하게 이해해야 합니다. 측정 기법, 입자경 분석기 종류 및 데이터 분석과 보고 방법 등이 결과에 많은 영향을 미칩니다.

## 섹션 2 — 샘플링 기법(Sampling Techniques)

공간 및 유속(시간이라고도 함)의 두 가지 다른 종류의 입자경 샘플링 기법이 있습니다.

### 공간 기법(Spatial technique)

공간 기법(즉, 공간 분포)은 주어진 부피를 차지하고 있는 입자들을 순간적으로 샘플링하는 것을 의미합니다. 일반적으로 공간 측정은 고속 촬영이나 광산란 장비와 같은 홀로그래프 방식을 이용하여 수집됩니다. 이런 종류의 측정은 각 클래스 크기에서의 개수 밀도와 단위 부피당 입자 개수에 민감합니다.

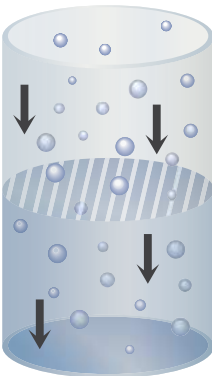


#### 측정 부피(Measurement volume)

- 유한한 부피에서 평균을 냄.
- 순간 샘플링.
- 개수 밀도에 민감.

### 유속 기법(Flux technique)

유속 기법(즉, 유속 분포)은 개별 입자가 샘플링 구간의 단면을 통과할 때 일정 시간 간격 동안 검사하는 방법입니다. 유속 측정은 일반적으로 개별 입자를 감지할 수 있는 최적의 기기에 의해 수집됩니다. 이런 종류의 측정은 입자 유속에 민감합니다.



#### 측정 단면(Measurement cross-section)

- 평균 시간.
- 입자 유속에 민감.

샘플링 기법은 입자경 데이터를 이해하는 데 중요합니다. 일반적으로 공간 기법을 사용하여 측정된 노즐은 유속 기법을 사용하여 측정된 노즐보다 평균적으로 입자경이 작은 것으로 보고됩니다. 다른 소스의 데이터를 비교할 때 샘플링 기법의 차이를 확인하십시오. 그러면 많은 데이터 불일치를 해결하는 데 도움이 됩니다.

유속 분포는 각 클래스 크기의 샘플 수를 해당 크기 클래스에서 입자의 평균 속도로 나누면 공간 분포로 변환할 수 있습니다. 스프레이의 모든 입자가 동일한 속도로 이동하는 경우 유속과 공간 분포는 동일합니다. 그러나 스프레이는 일반적으로 입자 속도에서 차이를 보이며 클래스 크기마다 다릅니다. 또한 이러한 차이는 노즐 종류, 용량 및 분무 압력에 따라 달라집니다. 아래의 표는 유속 및 공간 샘플을 모두 사용하여 동일한 조건에서 단일 노즐에 대한 부피 중간 직경(VMD 또는  $D_{v0.5}$ )을 마이크로미터 단위(microns 또는  $\mu\text{m}$ )로 나열합니다.

부피 중간 직경(Volume Median Diameter)	
유속(Flux)	공간(Spatial)
650 $\mu\text{m}$	530 $\mu\text{m}$

사용되는 샘플링 기법은 응용 분야에 따라 선택할 수도 있습니다. 예를 들어, 가스 컨디셔닝, 냉각 또는 유사한 공정은 공간 샘플링 기법이 더 효과적일 수 있습니다. 도장(페인팅)과 농업용 스프레이와 같이 정확한 스프레이 디포지션(deposition)이 요구되는 응용 분야에서는 유속 샘플링 기법이 더 적합합니다. 유속 방식은 개별 입자경에 더 민감하며 일부 응용 분야에서 요구되는 추가적인 정보를 제공합니다.



## 섹션 3 — 입자경 분석기(Drop Size Analyzers)

사용할 수 있는 입자경 분석기는 많습니다. 대부분의 분석기는 광학 방식을 사용하여 스프레이를 특성화합니다. 광학 방식은 영상 및 비영상의 두 가지 주요 범주로 나뉩니다. 영상은 사진과 홀로그래를 포함합니다. 비영상 방식은 두 부류로 나눌 수 있으며, 하나는 많은 수의 입자를 동시에 측정하고 (양상불), 다른 하나는 개별 입자를 한 번에 하나씩 세고 크기를 측정합니다 (단일 입자 카운터). 광학 분석기는 일반적으로 비침습적이며 테스트하는 동안 스프레이 작업에 영향을 미치지 않습니다.

반복 가능한 테스트 결과는 입자경 데이터 비교에 중요하므로 적절한 테스트 절차를 따라야 합니다. 분석기의 제한 사항을 포함한 테스트 변수를 결과에 요인으로 포함해야 합니다.

다음은 테스트 절차 및 가장 많이 쓰이는 입자경 분석기에 대한 개요입니다.

### 광학 영상 분석기(Optical imaging analyzers)

광학 영상 분석기는 공간 측정 기법을 이용합니다. 이러한 분석기는 광원(일반적으로 섬광 전구 또는 레이저), 비디오 카메라 및 컴퓨터로 구성됩니다. 스프레이를 비추기 위해 빛이 사용되며, 비디오 카메라를 이용하여 녹화됩니다. 그런 다음 영상을 스캔하고 입자경을 측정하여 여러 클래스로 구분합니다. 이 장치 개발 초기 단계의 오류 소스는 흐려짐, 피사계 심도의 변화 및 부적절한 샘플 크기 등이었습니다. 이러한 오류 소스는 파악되었고 해결되었습니다.

이런 종류의 분석기가 여전히 사용 중입니다. 초기에는 이러한 기기의 가용성은 제한적이었고 연구자 및 기타 입자경 분석 커뮤니티에서 관심을 가진 회원들이 다른 소스의 데이터를 확인하고 유사한 노출 설계의 성능을 비교하는 것이 어려웠습니다. 그러나 이제는 사용 가능한 기기 수가 증가했고 결과의 검증도 가능해졌습니다. 이러한 기기의 측정 범위는 상한 범위를 결정하는 시스템 광학에 따라 1 ~ 무제한  $\mu\text{m}$ 입니다. 일반적인 광학 영상 분석기의 계통도는 그림 1에 나와 있습니다.

광학 영상 분석기 제조업체는 다음과 같습니다:

- Oxford Laser, Inc., Didcot, United Kingdom  
(<http://www.oxfordlasers.com>)
- LaVision GmbH, Goettingen, Germany  
(<http://www.lavision.com>)

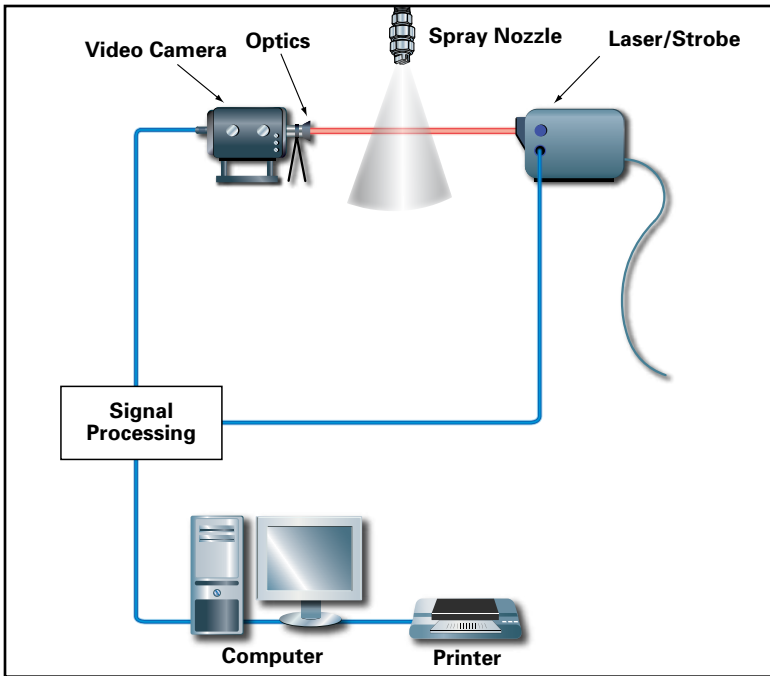


그림 1. 광학 영상 분석기(Optical imaging analyzer).

### 레이저 회절 분석기(Laser diffraction analyzers)

레이저 회절 분석기도 공간 샘플링 장치이지만 비영상(영상불) 범주에 속합니다. 이러한 분석기는 송신기, 수신기 및 컴퓨터로 구성됩니다. 이 기법은 분석기 샘플링 영역을 통과할 때 입자로 인해 산란된 빛의 세기 측정을 기반으로 합니다.

산란된 빛의 세기는 수신 장치에 내장된 일련의 반원형 광전 다이오드를 사용하여 측정됩니다. 곡선 적합 프로그램은 빛의 세기 분포를 여러 실험적인 입자경 분포 함수로 변환하는 데 사용됩니다. 이 기법을 사용하는 기기의 범위는 1.2 ~ 1,800  $\mu\text{m}$ 이지만, 최근에 일부 제조업체에서 측정 범위를 최대 3,000  $\mu\text{m}$ 까지 증가시켰습니다.

이 기기는 용량이 적은 이류체, 일류체 및 부채꼴 스프레이 노즐을 측정하는 데 가장 적합하며 프로토타입 노즐의 비교와 신속한 평가에 유용합니다. 이 기법의 가장 심각한 제한은 다중 산란으로 알려져 있습니다. 다중 산란은 스프레이 밀도가 너무 높아 감지기에 도달하기 전에 여러 입자에 의해 빛이 산란될 때 발생합니다. 따라서 입자경 분포를 계산하는 데 오차가 있습니다.

현재 사용되고 있는 가장 일반적인 레이저 회절 기기는 Malvern 분석기입니다. Malvern 분석기의 계통도는 그림 2에 나와 있습니다.



레이저 회절 기기 제조업체는 다음과 같습니다:

- Malvern Instruments Ltd., Worcestershire, United Kingdom  
(<http://www.malvern.co.uk>)
- Sympatec GmbH, Clausthal-Zellerfeld, Germany  
(<http://www.sympatec.com>)

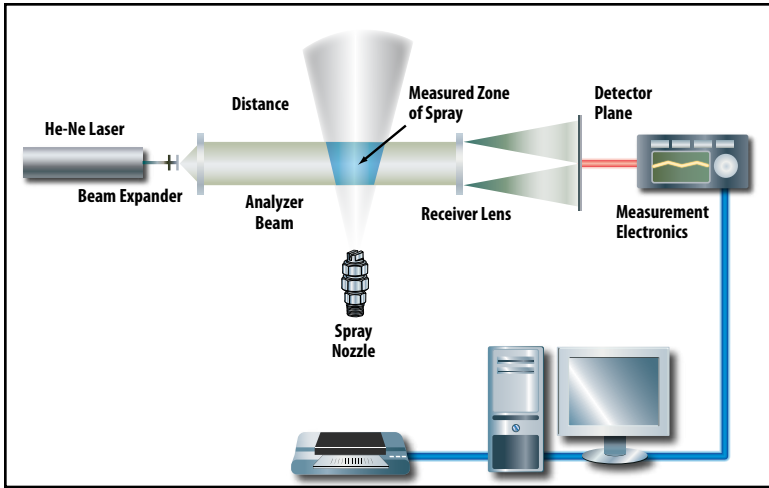


그림 2. 레이저 회절 분석기(Laser diffraction analyzer).

### 광학 어레이 프로브(Optical array probes)

광학 어레이 프로브는 유속 샘플링 기기이며 비영상(단일 입자 카운터) 범주에 속합니다. 광원(저출력 레이저 빔), 광전 다이오드 어레이 및 컴퓨터로 구성됩니다. 입자가 샘플링 평면을 통과할 때 크기와 개수를 측정하여 속도를 측정하는 데 사용할 수 있는 정보를 제공합니다. 데이터는 샘플링 지역을 통과하는 입자가 가리는 레이저 광선의 양을 측정하여 수집됩니다.

데이터 분석 루틴은 원시 입자 개수를 의미 있는 입자경 분포로 변환하는 데 필요합니다. 이러한 프로브의 일반적인 측정 범위는 100 ~ 12,400 μm 사이가 될 수 있습니다. 이러한 기기는 대용량 노즐에 가장 적합합니다. PMS-OAP 프로브의 계통도는 그림 3에 나와 있습니다.

가장 일반적인 광학 어레이 프로브는 PMS-OAP입니다:

- Particle Measuring Systems, Boulder, CO  
(<http://www.particlemeasuringsystems.com>)

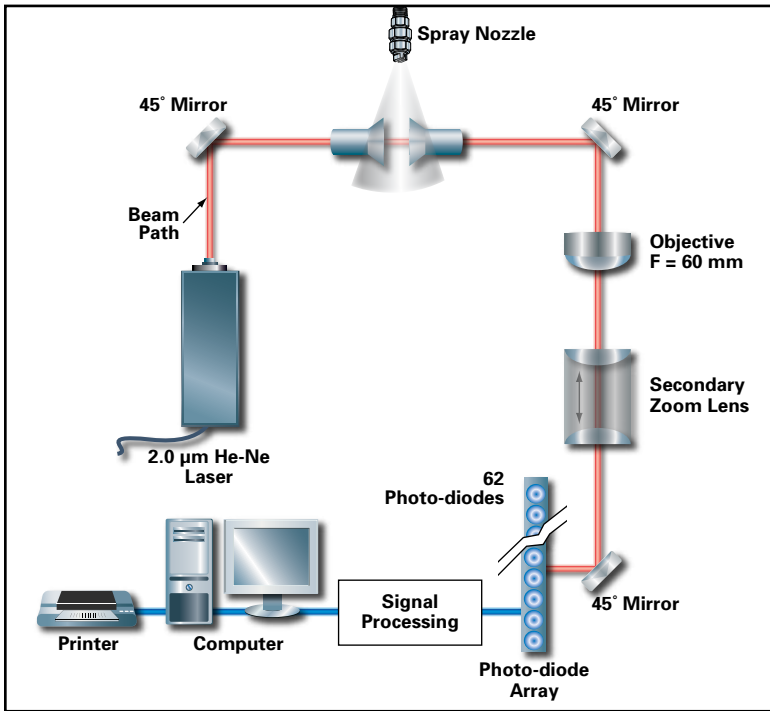


그림 3. 광학 어레이 프로브(Optical array probe).

### 위상 도플러 입자 분석기(Phase Doppler particle analyzers)

위상 도플러 입자 분석기(PDPA)는 유속 샘플링 기기이며 비영상(단일 입자 카운터) 범주에 속합니다. 이러한 분석기는 송신기, 수신기, 신호 처리기 및 컴퓨터로 구성됩니다. PDPA는 2차원 시스템을 위해 2개 빔 또는 4개 빔으로 분할되는 저출력 레이저를 사용합니다. 빔 스플리터와 주파수 모듈을 이용하여 이러한 레이저 빔이 프로브 볼륨이라고 하는 지점에서 다시 교차합니다. 입자가 프로브 볼륨을 통과할 때 산란된 빛이 간섭 무늬 패턴을 형성합니다.

산란된 간섭이 입자 속도에 비례하는 도플러 차이 주파수로 수신 장치를 통과합니다. 프린지 패턴의 공간 주파수는 입자 직경에 반비례합니다. 데이터 분석 루틴은 원시 입자 개수를 의미 있는 입자경 분포로 변환하는 데 사용됩니다. PDPA는 다양한 광학 구성을 사용하여 0.5 ~ 10,000 μm 범위의 크기를 측정합니다.

PDPA는 모든 용량에서 이류체, 일류체 및 부채꼴 스프레이 노즐에 가장 적합합니다. 전체 스프레이 평가와 입자 속도가 필요한 경우에 이상적입니다.

PDPA의 계통도는 그림 4에 나와 있습니다.

위상 도플러 분석기 제조업체는 여러 곳이 있습니다:

- Artium Technologies, Inc., Sunnyvale, CA  
(<http://www.artium.com>)
- Dantec Dynamics A/S, Skovlunde, Denmark  
(<http://www.dantecdynamics.com>)
- TSI Incorporated, Shoreview, MN (<http://www.tsi.com>)

각 분석기는 특정 종류의 테스트에 가장 적합합니다. 이러한 기기 사이에 일부 중복 측정 범위가 존재할 수 있습니다. 그러나 테스트 조건과 방법론에 대한 확실한 이해 없이는 이러한 다른 기기의 데이터를 비교하는 것은 거의 불가능합니다.

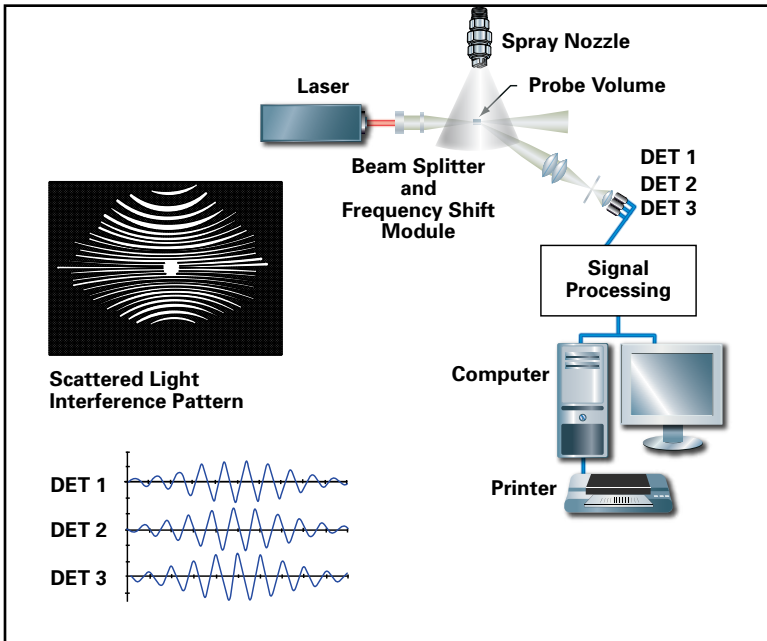


그림 4. 위상 도플러 분석기(Phase Doppler analyzer).

마찬가지로 광학 구성과 데이터 샘플링 방법이 다를 수 있으므로 같은 종류의 기기를 사용하더라도 다양한 노즐 제조업체의 데이터를 비교하기 매우 어렵습니다. 또한 부적절한 보정과 유지 관리는 결과에 영향을 미칠 수 있습니다. 많은 연구자들이 장비를 사용하는 실험실에서는 적절한 일정의 보정 테스트가 특히 중요합니다.

## 섹션 4 — 통계(Statistics)

입자경 분석기는 일반적으로 클래스 크기당 개수의 형태로 데이터를 수집하고 기록합니다. 데이터는 입자경 분포라고 하는 수학적 표현으로 배열됩니다. 수학적 표현은 종종 사용된 분석기에 종속됩니다. 그러나 최근에 일부 분석기 제조업체들은 사용자가 기본 입자경 분포 함수 대신 분포 함수의 목록에서 선택하는 것을 허용했습니다.

업계에서 사용되는 가장 일반적인 입자경 분포 함수는 로신-램러<sup>(1)</sup> 분포 함수와 ASTM<sup>®</sup> 표준 E799-03<sup>(2)</sup> 분석 및 로그 정규 분포입니다.

### 로신-램러 분포 함수(Rosin-Rammler distribution function)

$$F(D) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{D}{\bar{X}} \right)^N \right]$$

로신-램러 분포 함수는 Malvern 분석기의 기본 함수입니다. 측정에서 얻은 ( $\bar{X}$  및  $N$ ) 매개변수는 이 방정식에서 분포와 특성 또는 평균 직경을 계산하는 데 사용됩니다.

$$d_{pq}^{(p-q)} = \left[ \frac{\sum N_i d_i^p}{\sum N_i d_i^q} \right]$$

### ASTM 표준 E799-03

ASTM 표준 E799-03은 PMS-0AP 및 PDPA 같은 단일 입자 카운터로 분류되는 분석기에 사용하기에 가장 적합합니다. 이 표준은 입자 개수/직경을 분류하고 분포와 특성 또는 평균 직경을 계산하는 데도 사용됩니다.

업계에서 종종 사용되는 다른 많은 입자경 분포가 있습니다. 자세한 내용은 추천 자료를 참조하십시오.

### 로그 정규분포(Lognormal distribution)

변수 X는  $Y = \ln(X)$ 이 자연 로그를 나타내는 “LN”으로 정상적으로 분포되는 경우 로그 정규분포됩니다. 로그 정규분포의 확률 밀도 함수에 대한 일반 공식에서  $\theta$ 이 형상 매개 변수이고,  $\sigma$ 이 위치 매개 변수이며  $m$ 이 척도 매개 변수입니다.  $\theta = 0$ 이고  $m = 1$ 인 경우를 표준 로그 정규분포라고 합니다.  $\theta = 0$ 인 경우를 2-매개변수 로그 정규분포라고 합니다.

$$f(x) = \frac{e^{-((\ln(x-\theta)/m))^2/(2\sigma^2)}}{(x-\theta)\sigma\sqrt{2\pi}} \quad x \geq \theta; m, \sigma > 0$$

표준 로그정규분포의 방정식은:

$$f(x) = \frac{e^{-((\ln x)^2/2\sigma^2)}}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \quad x \geq 0; \sigma > 0$$

어떤 입자경 분포 함수를 사용하는지에 관계 없이 모두 본질적으로 같은 작업을 수행합니다. 결과는 특성 또는 평균 직경의 수집을 추출할 수 있는 수학적 입자경 분포입니다. 이러한 직경은 스프레이에서 다양한 평균 크기를 표현하는 단일 값입니다. 입자 직경은 일반적으로 마이크로미터 (microns 또는  $\mu\text{m}$ )로 표현됩니다. 1 마이크로미터는 0.001mm(1/25,400인치)에 해당합니다.



## 섹션 5 — 일반 용어(General Terminology)

용어는 종종 입자경을 이해함에 있어 불일치와 혼동의 주요 원인입니다. 평균 및 특성 직경은 입자경 분포에서 추출된 직경입니다(그림 5 참조). 한 노즐과 다른 노즐의 입자경을 비교하려면 비교 대상으로 동일한 직경을 사용해야 합니다. 예를 들어, 한 노즐의  $DV_{0.5}$ 와 다른 노즐의  $D_{32}$ 를 비교할 수는 없습니다. 다음은 가장 많이 사용되는 평균 직경(mean diameters) 및 지표 직경(characteristic diameters), 정의 그리고 가장 적합한 활용입니다. 입자 크기 용어는 ASTM® 표준 E1620-97<sup>(1,3)</sup>에서 볼 수 있습니다.

**$D_{V0.5}$ :** 부피 중간 직경(Volume Median Diameter; VMD 또는 MVD). 분사되는 액체의 부피 측면에서 입자경을 표현하는 수단입니다. VMD는 분사되는 액체의 총 부피(또는 질량)의 50%가 평균 값보다 직경이 큰 입자로, 50%는 평균 값보다 작은 입자로 구성되는 경우의 값입니다. 이는 다양한 분석 장비에서 평균 입자 크기를 비교하는 데 많이 사용됩니다.

**$D_{V0.1}$ :** 분사되는 액체의 총 부피(또는 질량)의 10%가 이 값보다 작거나 같은 직경의 입자로 구성되는 값입니다. 이 직경은 개별 입자의 표류 전위를 평가하는 데 가장 적합합니다.

**$D_{min}$ :** 스프레이에 존재하는 부피(또는 질량)에 의한 최소 입자경입니다. 이 직경은 개별 입자의 표류 전위를 평가하는 데도 사용됩니다.

**$D_{V90}$ :** 분사되는 액체의 총 부피(또는 질량)의 90%가 이 값보다 작거나 같은 직경의 입자로 구성되는 값입니다. 이 측정은 스프레이의 완전 증발이 필요할 때 가장 적합합니다..

**$D_{max}$ :** 스프레이에 존재하는 부피(또는 질량)에 의한 최대 입자경입니다. 이 직경 또한 스프레이의 완전 증발이 필요할 때 사용됩니다.

**$D_{32}$ :** 자우터 평균 직경(Sauter Mean Diameter; SMD)은 스프레이에 의해 생성되는 표면 영역의 측면에서 스프레이의 미세함을 표현하는 수단입니다. SMD는 모든 입자의 전체 표면에 대한 모든 입자의 총 표면적 비율과 동일한 표면에 대한 부피를 가진 입자의 직경입니다. 이 직경은 화학 반응에서 효율과 질량 전달 속도를 계산하는데 가장 적합합니다.

**$D_{10}$ :** 산술 평균 직경(Arithmetic mean diameter). 이 직경은 증발율을 계산하는데 가장 적합합니다.

**$D_{20}$ :** 표면 평균 직경(Surface mean diameter). 이 직경은 흡수(absorption) 같은 표면 제어 응용 분야에 가장 적합합니다..

**$D_{30}$ :** 부피 평균 직경(Volume mean diameter). 이 매개변수는 수문학(hydrology) 같은 부피 제어 응용 분야에 가장 적합합니다.

**$D_{21}$ :** 표면 평균 직경(Surface mean diameter). 이 매개변수는 흡수 연구에



가장 적합합니다.

$D_{31}$ : 평균 증발 직경(Mean evaporative diameter). 이 직경은 증발 및 분자 확산 연구에 가장 적합합니다.

$D_{43}$ : Herdan 직경(Herdan diameter). 이 직경은 연소(combustion) 연구에 가장 적합합니다.

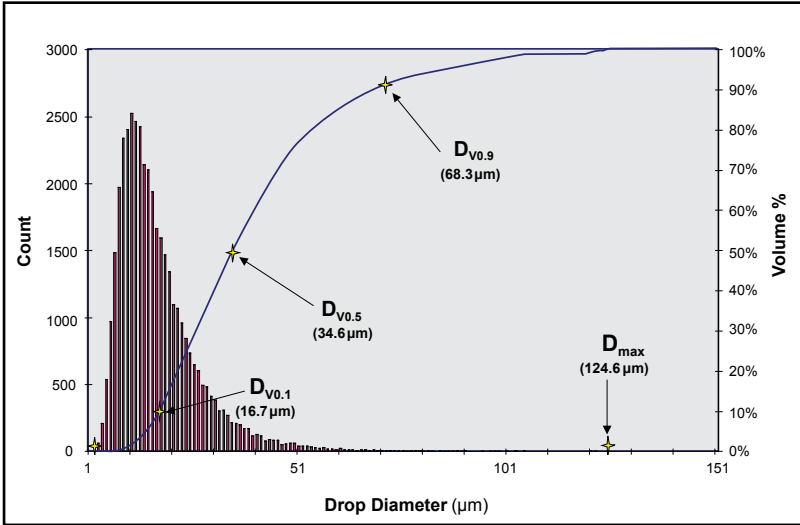


그림 5. 일반 입자경 분포(Typical drop size distribution).

## 섹션 6 — 입자 모집단 관련 용어(Terms Related to Drop Population)

**입자경 분포(Drop size distribution):** 스프레이 샘플에서 입자경 분포. 이 분포는 일반적으로 크기 대 누적 부피 퍼센트로 표현됩니다.

**유속(Flux):** 단위 시간당 지정된 평면 영역을 흐르는 입자 수.

**유속에 민감(Flux-sensitive):** 측정된 크기가 샘플링 지역을 통해 입자의 트래픽에 반응하는 경우의 샘플링 프로세스입니다.

**유속/임시 크기 분포(Flux/temporal size distribution):** 개별 입자 개수와 크기가 지정된 경우 지정된 시간 간격 동안 평면 샘플링 존을 통과하는 입자의 크기 분포입니다.

**전역(Global):** 입자의 총 확산의 측정 또는 관찰을 나타냅니다(예: 전체 액체 스프레이의 대표 샘플).

**로컬(Local):** 큰 관심 영역 중 작은 부분의 측정 또는 관찰을 나타냅니다.

**개수 밀도(Number density):** 주어진 순간에 지정된 공간 부피에 포함된 입자 수.

**상대적 분포구간 지수(Relative Span Factor; RSF):** 입자경 분포의 균일성을 나타내는 무한 매개변수. RSF는 다음과 같이 정의됩니다.:

$$\frac{D_{V0.9} - D_{V0.1}}{D_{V0.5}}$$

**대표 샘플(Representative sample):** 임의 변동의 효과를 허용할 정도로 작게 충분히 측정된 요소가 포함된 샘플.

**공간 평균(Spatial averaging):** 더 큰 샘플링 구역의 대표적인 분포로 확산되는 액체 내의 지역 또는 위치에 대한 입자경 분포의 조합.

**공간 해상도(Spatial resolution):** 지역 내의 입자경 변화의 크기를 고려하여 총 관심 지역에 상대적인 입자 샘플의 크기와 물리적인 분리.



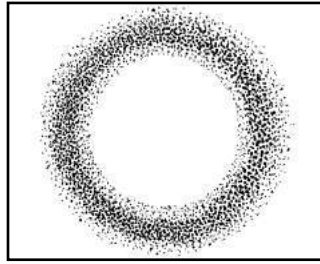


## 섹션 7 — 입자경에 영향을 미치는 요소 (Factors Affecting Drop Size)

입자경 및 입자경 균일도는 다음과 같은 여러 가지 요소에 따라 달라집니다: 용액의 특성, 용액 점도, 스프레이 노즐 디자인, 스프레이 노즐을 통과하는 유량, 공기 압력(이류체 노즐을 사용 중인 경우)

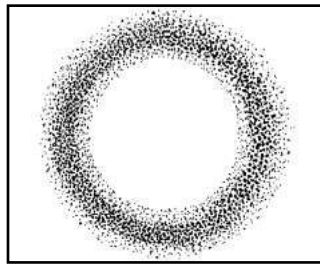
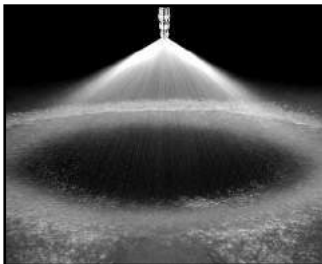
**노즐 종류:** 일반적으로 원형 노즐의 입자경이 가장 크며, 그 다음으로 부채꼴 노즐과 중공원형 노즐 순입니다. 이러한 경향은 일류체 및 이류체 노즐에 동일하게 적용되지만 이류체 노즐은 일반적인 일류체 노즐보다 크기가 작은 초미세 입자를 제공합니다.

### 중공원형 노즐(와류실형)



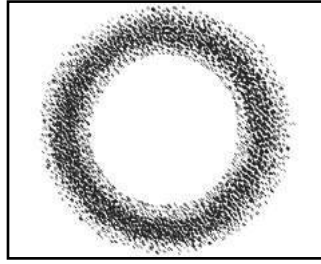
확장된 범위의 용량과 입자경은 작은 입자경과 용량의 조합이 요구되는 다양한 응용 분야에서 중공원형 노즐을 유용하게 사용할 수 있도록 해줍니다.

### 중공원형 노즐(편향형)



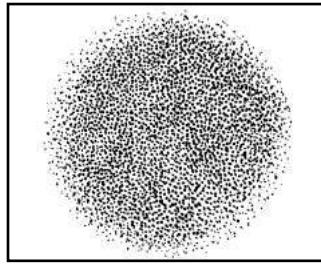
입자가 작은 중공원형 패턴.

중공원형 노즐(나선형)



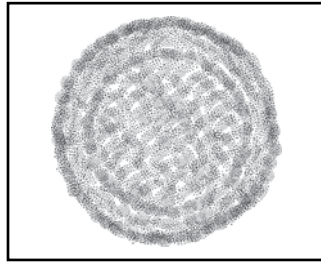
입자가 약간 거친 중공원형 패턴.

원형 노즐(플콘)



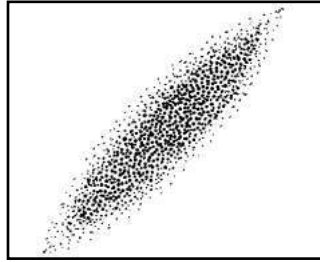
보통부터 큰 입자 크기의 균일하고 둥근 전체 스프레이 패턴.

원형 노즐(나선형)



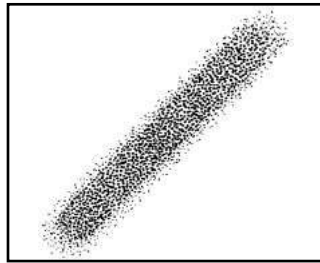
입자가 상대적으로 거친 중공원형 패턴.

부채꼴 스프레이 노즐(테이퍼형)



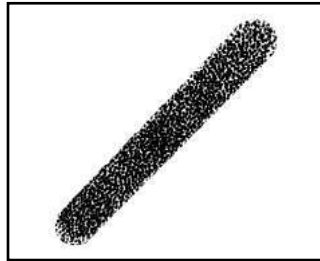
입자가 중간 크기인 테이퍼 에지형 부채꼴 패턴.

부채꼴 스프레이 노즐(둥근 테두리)



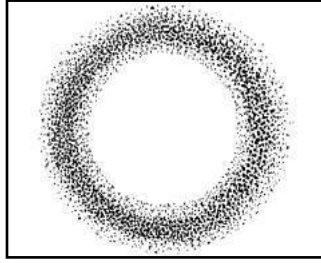
중간 크기 입자를 생성하는 얇은 직사각형 패턴.

부채꼴 스프레이 노즐(편향형)



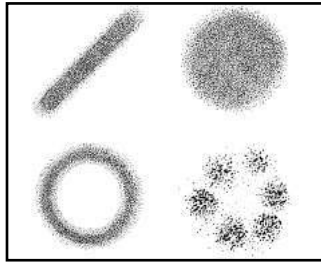
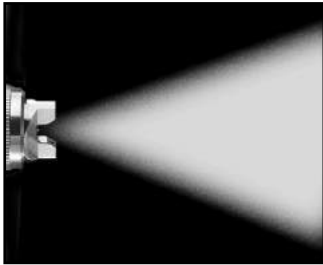
대형 이물 통과경 디자인으로 막힘이 감소하고 중간 크기 입자를 생성.

### 일류체 미세분무 노즐(미세 미스트)



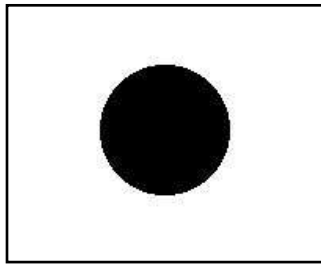
저용량 스프레이로 중공원형 패턴의 작은 입자 생성.

### 이류체 및 에어 지원 노즐



미세분무는 에어 및 액체 압력의 조합을 사용하여 작은 입자경을 생성.

### 일직선형 노즐



액체를 일직선으로 분사. 미세분무가 발생하지 않음.  
(그림은 설명 목적으로만 제공.)

**유량(Flow rate):** 유량은 입자경과 직접적인 관련이 있습니다. 유량을 증가시키면 입자경이 증가합니다. 마찬가지로 유량을 감소시키면 입자경이 감소합니다.

예시: 0.7 bar(10 psi)의 946 l/min(250 gpm) 중공원형 노즐은 0.7 bar(10 psi)의 852 l/min(225 gpm) 중공원형보다 입자경이 더 크며, 마찬가지로 0.5 bar(7 psi)의 454 l/min(120 gpm) 원형 노즐은 같은 압력의 606 l/min(160 gpm) 원형 노즐보다 입자 크기가 작습니다.

**압력(Pressure):** 압력은 입자경에 반비례 효과를 미칩니다. 압력을 증가시키면 입자경이 감소하고, 압력을 감소시키면 입자경이 증가합니다.

예시: 1.9 l/min(0.5 gpm) 부채꼴 스프레이 노즐은 3.5 bar(50 psi)보다 1.4 bar(20 psi)에서 입자 크기가 더 크며, 마찬가지로 946 l/min(250 gpm) 나선형 노즐은 0.7 bar(10 psi)보다 1.0 bar(15 psi)에서 입자 크기가 더 작습니다.

**스프레이 각도(Spray angle):** 스프레이 각도는 입자 크기에 반비례 효과를 미칩니다. 스프레이 각도를 증가시키면 입자 크기가 감소하고, 스프레이 각도를 감소시키면 입자경이 증가합니다.

예시: 스프레이 각도가 50°인 3.8 l/min(1 gpm) 부채꼴 스프레이 노즐은 스프레이 각도가 110°인 3.8 l/min(1 gpm) 부채꼴 스프레이 노즐보다 입자 크기가 더 큼니다.

**액체 특성(Liquid properties):** 점성과 표면 인장은 스프레이를 미세분무하는데 필요한 에너지의 양을 증가시킵니다. 일반적으로 이러한 특성이 증가하면 입자 크기가 증가합니다.

**점성(Viscosity):** 유체 내에 내부 마찰이 존재하면 유량에 대한 저항이 나타나는 액체의 특성입니다.

점성이 증가하는 경우:

- 유량이 감소합니다.
- 가장자리가 무거워집니다.
- 적절한 스프레이 각도/커버리지를 유지하기 위해 더 높은 최소 압력이 필요합니다.
- 용량이 증가합니다.
- 입자경이 증가합니다.

**표면 인장(Surface intension):** 표면 분자가 강한 안쪽 인력을 보여 최소 영역에 수축하려는 경향을 보이는 탄력성 표면을 형성하는 액체의 특성입니다.

표면 인장이 증가하는 경우:

- 최소 작동 압력이 증가합니다.
- 스프레이 각도가 감소합니다.
- 입자경이 증가합니다.

**비중(Specific gravity):** 물의 밀도에 상대적인 액체의 밀도 — 일반적으로 16°C(60°F)에서 측정되며, 밀도는 0.9991 g/cm<sup>3</sup>(64.4 lb/ft<sup>3</sup>)입니다. 비중이 높으면 용량이 줄고 비중이 낮으면 용량이 늘어납니다.

## 섹션 8 — 입자경 데이터 양식(Drop Size Data Forms)

입자경 데이터는 다양한 양식으로 출판되거나 보고됩니다. 가장 일반적인 양식은 특정 직경(VMD/SMD) 보고서와 그래프 및 입자경 분포(그래프와 표)입니다. 입자경의 사용 목적에 따라 일부 데이터 양식이 다른 양식보다 유용할 수 있습니다. 아래에서 각 데이터 양식의 제안되는 용도를 안내합니다.

**VMD/SMD 리포트:** 요청된 입자경 정보를 표 형식으로 표시한 것입니다. 이러한 보고서는 종종 특정 압력 또는 유량 조건에서 특정 노즐의 VMD 또는 SMD 목록을 보여줍니다. 이 데이터는 특정 작동 조건에서 한 노즐과 다른 노즐의 입자경을 비교하는 데 가장 적합합니다.

VMD / SMD 리포트			
노즐 ID	압력 (psi) Water Air	유량 (gpm)	부피 중간 직경 (μm)
중공원형 노즐	60 (4.1 bar)	0.84 (3.2 l/min)	490
이류체 노즐	40 (2.8 bar)	0.47 (1.8 l/min)	120
이류체 노즐	40 (2.8 bar)	0.84 (3.2 l/min)	170

**VMD/SMD 그래프:** 요청된 입자경 정보를 그래픽 형식으로 표시한 것입니다. 종종 같은 그래프에 여러 노즐을 포함합니다. 요청된 압력 또는 유량 범위에 대한 VMD 또는 SMD를 보여줍니다. 다음 페이지의 그림 6과 7을 참조하십시오. 이런 유형의 데이터는 입자경에서 증가된 압력 또는 유량의 효과를 설명하는 데 주로 사용됩니다.

**입자경 분포:** 특정 노즐의 입자경 분포를 표 또는 그래픽으로 표현한 것입니다. 표 데이터 양식은 일반적으로 사용된 분석기, 샘플링 방법 및 데이터 처리 기준<sup>(4)</sup>을 나열합니다. 또한 누적 부피 분포, 각 크기 클래스의 퍼센트 및 특정 직경도 포함됩니다. 그래픽 데이터 양식은 일반적으로 표 양식에 포함되는 모든 데이터를 포함하지만, 누적 부피 퍼센트와 입자경은 그래프로 표현됩니다. 이런 유형의 데이터는 스프레이의 전체 입자경 분포를 연구하는 데 가장 적합합니다. 그림 8을 참조하십시오.

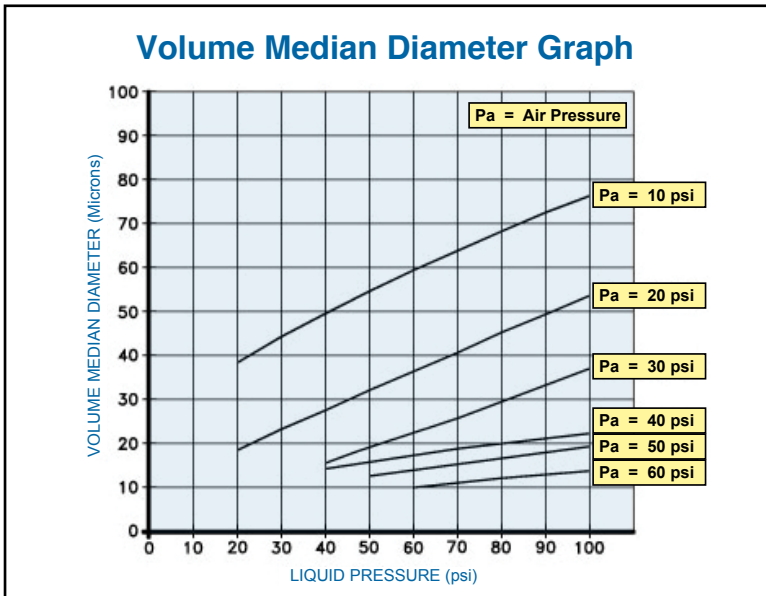


그림 6. 압력 단위는 psi.

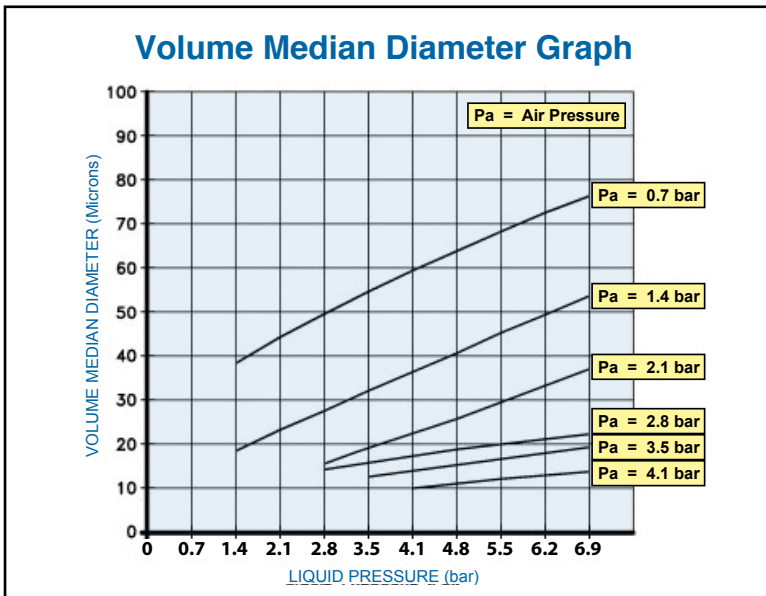


그림 7. 압력 단위는 bar.



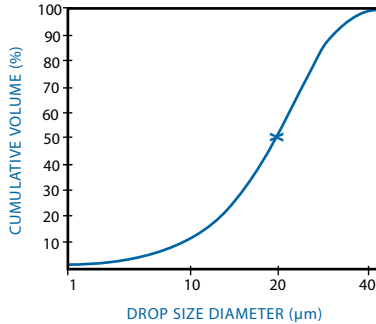
## Drop Size Analysis

Analyzer: Malvern 2600C (1800µm max)

Sampling Method: Spatial

All values computed using the Rosin-Rammler distribution.

Diameter (µm)	Volume (%)	Number (%)
2	0.20	0.00
3	0.31	9.42
3	0.47	20.80
4	0.71	27.96
5	1.08	37.15
5	1.65	45.55
6	2.50	52.61
7	3.80	60.30
8	5.74	67.02
10	8.63	73.40
12	12.88	79.32
14	18.98	84.55
16	27.48	89.17
18	38.77	93.01
22	52.72	95.96
25	68.13	98.02
30	82.55	99.23
35	93.05	99.79
40	98.29	99.97
47	99.80	100.00



### Mean Diameters and Distribution Parameters

Arithmetic mean	D <sub>10</sub> :	8 µm
Surface mean	D <sub>20</sub> :	10 µm
Volume mean	D <sub>30</sub> :	12 µm
Surface-diameter mean	D <sub>21</sub> :	12 µm
Evaporative mean	D <sub>31</sub> :	15 µm
Sauter Mean Diameter	D <sub>32</sub> :	17 µm
Herdan mean	D <sub>43</sub> :	21 µm
Volume Median Diameter	D <sub>V0.5</sub> :	21 µm
Number median diameter	D <sub>N0.5</sub> :	6 µm
Relative Span Factor	(RSF):	1.06
Coefficient of Variance	(CV):	3.28

그림 8.

## 섹션 9 — 입자경 데이터 사용에 대한 실제적 고려 사항(Practical Considerations for Drop Size Data Use)

입자경 데이터는 많은 변수에 의존할 뿐만 아니라 해석에 의해서도 좌우됩니다. 다음은 입자경 데이터를 쉽게 이해하고 효과적으로 사용하도록 제안하는 몇 가지 가이드라인입니다.

**데이터 수집 반복성 및 정확도:** 입자경 테스트는 개별 테스트의 데이터가  $\pm 6\%$  이상 차이가 나지 않는 경우 반복적이라고 합니다. 이 수치는 실리콘 카바이드나 세라믹과 같이 표면 마감이 불균일한 노즐의 경우 더 클 수 있습니다. 즉, 테스트 결과가  $100\ \mu\text{m}$ 의 VMD를 나타내는 경우 결과 범위가  $94 \sim 106\ \mu\text{m}$ 인 테스트는 동일한 것으로 간주될 수 있습니다.

**계측기 및 보고 편향:** 계측기 및 보고 편향은 논의되었지만 노즐 성능을 평가하고 제안하는 일을 담당하는 사람에게는 매우 중요합니다. 특히 다른 출처로 부터 데이터를 평가할 때 유효한 데이터 비교를 위해서는 계측기의 종류와 사용 범위, 샘플링 기법 및 각 크기 클래스의 퍼센트 부피를 파악하는 것은 대단히 중요합니다.

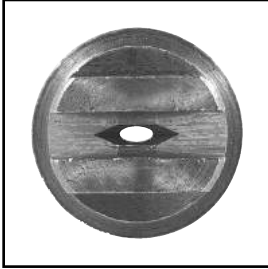
**상대적 분포구간 지수(RSF):** 다른 노즐에서 입자경 분포를 비교하는 것은 혼란스러울 수 있습니다. RSF는 분포를 단일 개수로 줄입니다. 이 매개 변수는 입자경 분포의 균일성을 나타냅니다. 이 숫자가 1에 가까울 수록 스프레이는 더 균일해집니다. 즉, 분포가 치밀할 수록  $D_{\max}$ 부터  $D_{\min}$ 까지의 변화가 최소화됩니다. RSF는 다양한 입자경 분포를 비교하는 실용적인 수단을 제공하며 가능하면 이를 사용해야 합니다.

**어플리케이션 고려:** 어플리케이션에 가장 적합한 판독의 입자경 평균 직경을 선택합니다. 단순히 대체 노즐의 입자경을 비교하는 것이 목적이라면 VMD/SMD 보고서로도 충분합니다.  $D_{\max}$ ,  $D_{\min}$  등에 대한 보다 자세한 정보는 입자 증발에 대한 상세한 정보가 필요할 때 사용해야 합니다.

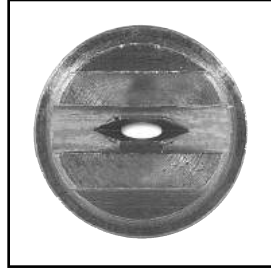
**액체 특성:** 일반적으로 노즐 제조업체에서 제공하는 입자경 데이터는 실험실 조건에서 물을 분사하는 것을 기본으로 합니다. 입자 크기에 민감한 공정의 경우, 노즐을 선택할 때는 액체 특성의 영향을 이해하고 고려해야 합니다.

**노즐 마모:** 노즐 마모는 노즐 성능에 영향을 미칩니다. 일반적으로 스프레이 모양이 나빠지고 유량과 입자경이 증가합니다:

**유량 변화:** 모든 노즐에서 오리피스 표면 및/또는 내부 베인 또는 코어의 성능이 떨어지기 시작하면 유량이 증가합니다. 유량이 증가하거나 분사 압력이 떨어져도 입자경이 커질 수 있습니다. 그러나 노즐 팁은 육안상의 검사로는 마모를 거의 확인할 수 없습니다. 그러므로 변화를 감지하려면 유량을 모니터링해야 합니다.



정상 스프레이 팁.

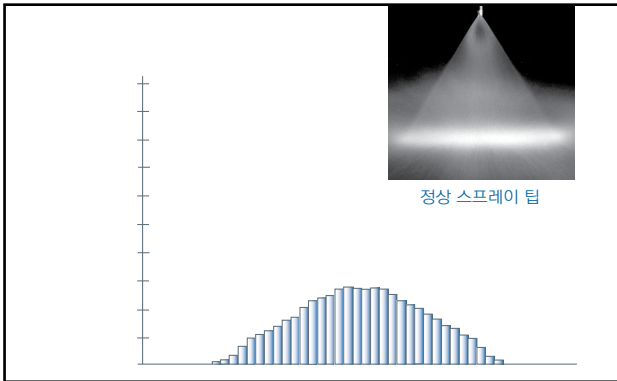


마모된 스프레이 팁. 이 팁은 용량의 30% 이상을 분사합니다.

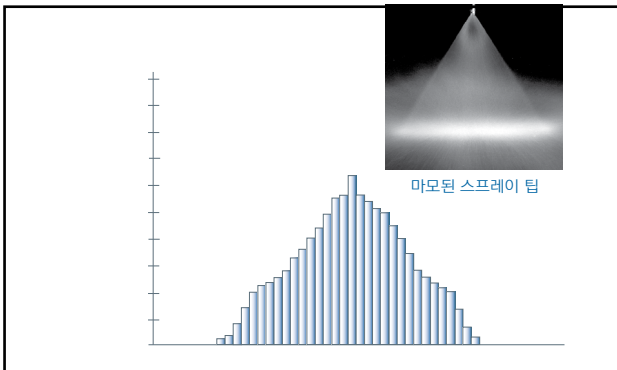
**입자 크기 증가:** 노즐 오리피스가 마모되면 액체 유량이 증가하거나 분사 압력이 감소합니다. 입자가 커지고 전체 액체 표면 영역이 감소합니다.

실제 입자 크기		
1인치 = 25,400 $\mu\text{m}$		
1밀리미터 = 1,000 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$	1,200 $\mu\text{m}$
$\mu\text{m}$ = 마이크로미터		
		5,500 $\mu\text{m}$

경우에 따라 스프레이 패턴에 줄무늬가 생기거나 두꺼운 가장자리/영역이 나타나기 때문에 스프레이 노즐 마모를 감지할 수 있습니다. 그러나, 다른 경우에는 스프레이 패턴이 좋아 보입니다. 아래의 차트는 스프레이 수집 튜브를 사용하는 경우의 차이를 보여줍니다. 마모된 팁은 용량의 30% 이상을 분사하고 있습니다.



정상 스프레이 팁.



마모된 스프레이 팁.

**스프레이 충격력 감소:** 마모된 노즐은 낮은 압력에서 작동하므로 스프레이 충격력이 감소합니다.

다음 방정식을 사용하여 이론적인 총 스프레이 충격력을 계산할 수 있습니다.

$$I = K \times Q \times \sqrt{P}$$

**I:** 이론적인 총 스프레이 충격력

**K:** 상수

**Q:** 유량

**P:** 액체 압력

<b>I</b>	파운드	킬로그램
<b>K</b>	0.0526	0.024
<b>Q</b>	gpm	l/min
<b>P</b>	psi	kg/cm <sup>2</sup>

**침식 및 마모:** 노즐 재질의 점차적인 탈락은 오리피스와 내부 유량 통로가 확장되거나 왜곡되는 원인이 됩니다. 스프레이 패턴이 불규칙해지고 입자가 커질 수 있습니다.



정상



과도한 마모

**부식:** 노즐 재질은 분사하는 액체 또는 환경의 화학 작용으로 인해 부식될 수 있습니다. 작은 마모라 해도 입자경과 균일도에 부정적인 영향을 미치게 됩니다.



정상



부식

**고착 또는 수염현상:** 액체 증발로 인해 노즐 오리피스의 내부 또는 외부 가장자리에 원료가 축적될 수 있습니다. 건조된 고형물 층이 오리피스 또는 내부 유량 통로를 가로막고 입자경과 스프레이 성능을 저하시킬 수 있습니다.



정상



고착

**막힘:** 원하지 않는 고형 입자가 오리피스 내부를 막을 수 있습니다. 유량이 제한되고 스프레이 패턴 균일도가 손상됩니다.



정상 노즐



막힌 노즐

**스프레이 무결성 유지(또는 스프레이 성능 유지):** 스프레이 노즐 마모 및 관련 성능 변화가 필연적이라면, 이들을 효과적으로 관리할 수 있습니다. 입자경이 중요한 스프레이 어플리케이션에서는 스프레이 노즐 성능을 자주 관찰하고 테스트해야 합니다. 초기 마모가 감지된 후라도 압력 및 유량의 수동 조절을 통해 노즐을 원하는 대로 작동시킬 수 있습니다. 사전 노즐 유지 보수 계획 수립에 대한 자세한 내용은 <기술 매뉴얼 410, 스프레이 시스템 최적화>를 참조하십시오.

또한 스프레이 시스템 성능을 모니터링하고 스프레이 무결성을 자동으로 유지할 수도 있습니다. 특수 알고리즘으로 프로그래밍된 스프레이 컨트롤러는 필요에 따라 스프레이 압력과 유량을 자동으로 조절하여 노즐 마모가 발생할 때 입자경 요구 사항을 유지할 수 있습니다. 이러한 컨트롤러는 시스템 작동을 최고의 효율로 유지할 수 있으며, 제품이나 공정 품질을 저하시키지 않으면서 스프레이 노즐의 사용 수명을 크게 연장시킬 수 있습니다.

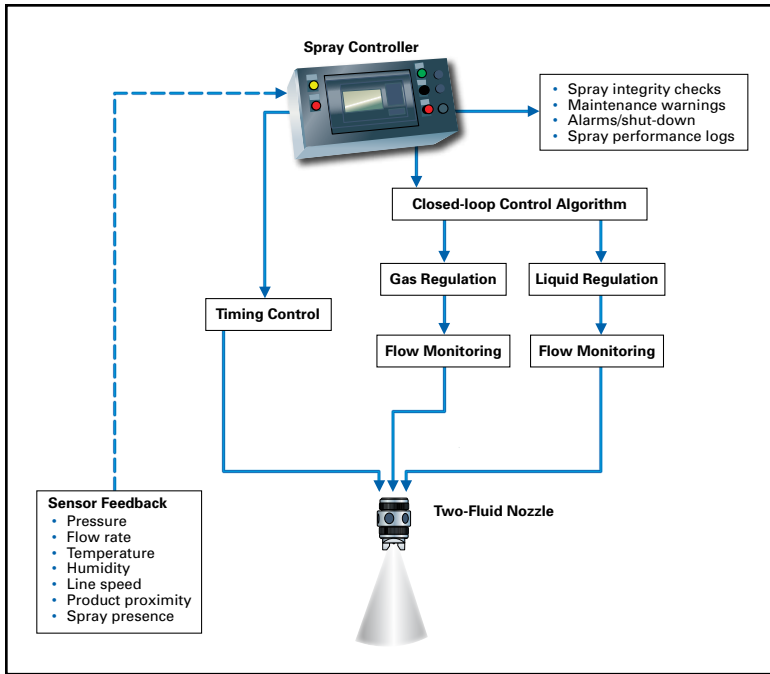


그림 9. 전용 스프레이 컨트롤러가 펌프 제어 알고리즘과 고급 타이밍 제어를 스프레이 작동을 자동화하고 개선합니다.

## 섹션 10 — 참조(References)

1. Marshall, W.R. Atomization and Spray Drying; University of Wisconsin Madison, Department of Chemical Engineering. June 1954: 50-56.
2. E799-03: Standard Practice for Determining Data Criteria and Processing for Liquid Drop Size Analysis. Book of ASTM® Standards, General Methods and Instrumentation, Volume 14.02: 535-539.
3. E1620-97: Standard Terminology relating to liquid particle statistics. Book of ASTM Standards, General Methods and Instrumentation, Volume 14.02: 810-812.
4. Jerry Ferrazza, Wes Bartell and Rudolf Schick, Spraying Systems Co. Spray nozzle drop size: How to evaluate measurement techniques and interpret data and reporting procedures. Bulletin 336, (1992).

## 조직(Organizations)

### Institute for Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS):

ILASS-Americas는 액체 분무와 관련된 전문 활동에 참여하고 있는 기업가, 연구자, 학계 및 학생들의 조직입니다. 이 조직은 International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS)의 결과로 설립되었습니다. ILASS의 목적은 미세분무 및 스프레이 프로세스를 이용하는 다양한 분야의 과학자와 엔지니어 간의 상호 작용을 촉진하기 위한 것입니다. ILASS-Americas의 가입 자격은 아메리카 대륙에 있는 국가의 주민으로 제한됩니다.

ILASS-Americas는 학제간 영역이지만 다음 4가지 주요 영역에 초점을 맞추고 있습니다:

1. 스프레이 연소, 농약 살포, 스프레이 리액터, 건조기, 가슴기, 스프레이 코팅 및 스프레이 냉각 같이 액체가 사용되는 전송 프로세스.
2. 스프레이의 유체 역학, 이론 및 스프레이 모델링의 구현.
3. 입자경, 속도, 밀집도 및 패턴 측정을 위한 기기.
4. 액체 아토마이저 및 스프레이 시스템의 설계와 작동.

국제 ILASS 조직에 연락처를 제공하는 것 외에 ILASS-Americas의 기본 활동은 실용적 응용과 기본적인 주제에 대한 현재 연구에서 보고하는 연례 회의입니다. 각 프레젠테이션의 확장된 요약은 회의에서 배포되는 한 장의 CD에 수록되고 이후에 회원들에게 제공됩니다.

ILASS 활동에 대한 질문은 아래 주소로 문의할 수 있습니다:

ILASS-Americas Secretariat  
Department of Mechanical Engineering  
University of California  
Irvine, CA 92717  
<http://www.ilass.org>

### ASTM® E29.04 Subcommittee:

ASTM Committee E29 on Particle and Spray Characterization은 1969년 설립되었습니다. E29는 약 15명의 회원이 이들간의 기술 미팅에 참석하며 매년 10월 모임을 갖습니다. 현재 회원 수가 약 70명인 위원회는 현재 Annual Book of ASTM Standards, Volume 14.02 에서 발행하는 20개 표준을 관할하고 있습니다. Standard Specification E11 for Wire-Cloth Sieves for Testing Purposes는 ASTM 내에서 가장 널리 참조되는 문서입니다.

ASTM®  
100 Barr Harbor Drive  
West Conshohocken, PA 19428-2959  
Tel: (610) 832-9585; Fax: (610) 832-9555  
<http://www.ASTM.org>





**추천 문서(Suggested reading)**

***Atomization and Sprays: Journal of the International Institutes for Liquid Atomization and Spray Systems***

스프레이의 응용과 활용은 새로운 것이 아니지만 미세분무에 대한 과학적 관심이 증가하고 있으며 높은 전단 속도 조건에서의 액체의 물리적 구조와 가스 흐름과의 상호 작용을 이해할 필요가 있습니다. Atomization and Sprays는 고품질 연구, 응용 분야 및 리뷰 문서의 프레젠테이션을 통해 이런 필요를 해결하는 국제 저널입니다.

저널에 대한 질문은 아래로 문의할 수 있습니다:

Atomization and Sprays  
Professor Norman Chigier; Editor  
Department of Mechanical Engineering  
Carnegie Mellon University  
5000 Forbes Ave.  
Pittsburgh, PA 15213-3815  
<http://www.begellhouse.com>

***Atomization and Sprays***

Arthur H. Lefebvre; West Lafayette, Indiana

사본을 특별 주문하려면 Macmillan Publishers New Zealand  
(<http://www.macmillan.co.nz>)로 문의하십시오.

***Science and Engineering of Droplets***

Huimin Lui; William Andrew Publishing, LLC  
Norwich, NY

***Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays***

William A. Sirignano  
University of California, Irvine  
Cambridge University Press





## Spray Analysis and Research Services

스프레이시스템코리아

인천광역시 남동구 함박외로377번길 145

Tel: 032.821.5633

Fax: 032.811.6629

[www.spray.co.kr](http://www.spray.co.kr)



**Spraying Systems Co.**<sup>®</sup>  
Experts in Spray Technology



Spray  
Nozzles



Spray  
Control



Spray  
Analysis



Spray  
Fabrication

