

# 광폭면 분무를 위한 2유체 노즐의 분무 특성에 관한 연구

이 중 순<sup>†</sup>

## An Experimental Study on the Spray Characteristics by Twin-Fluid Atomizer for Wide Band Spray

Joongsoon Lee

**Key Words:** Particle Motion Analysis System(분무입자해석장치), Dual Exposure Spark Light Source(2중방진광원), Image Frame Grabber(화상취득장치), Reticle(레티클), Sauter Mean Diameter(Sauter 평균입경), Twin-Fluid Atomizer(2-유체노즐)

### Abstract

To develop the twin-fluid atomizer having the excellent performance of painting, the spray characteristics of how a wide area can be painted efficiently by one time spraying were studied in this paper. Spray phenomena are affected by the many factors determining the spray field such as the spraying pressure of gas, the spraying pressure and viscosity of liquid paints, the opening duration of needle valve, the design dimension of nozzle, and so on. As the results of experiments, these factors affecting on spray characteristics were suggested as followings; 1) The optimum spraying pressure of gas was 0.015~0.02 kPa, and the appropriate spraying pressure of liquid paint was 0.01 kPa. In these situations, the setting up pressures must be compensated as much as the losing amount of pressure because a decompression occurred when operating valves. 2) The duration of opening the needle valve must be sustained for 1~2 seconds to inject gas after spraying the liquid paint. This operating of the needle valve was necessary to avoid the affect on the changing of liquid column length, and to prevent the droplet deposit at the initial time of spraying. 3) The spray tip penetration was gained form the experimental equation, and the effective spraying angle was  $85^{\circ} \pm 5^{\circ}$  just at the appropriate spraying pressure of gas. The distribution of the area sprayed had the variation in  $350 \pm 50$  mm because of the spraying pressure of gas, the its distance from the spray tip, and the lift of the needle valve.

### 1. 서 론

1회의 분무로 넓은 폭을 가진 광폭면을 효율적으로 도포할 수 있는 2-유체 노즐의 개발과 분무특성에 따른 연구를 통하여 차량 도장면의 성능 향상과 액체의 미립화는 노즐의 형상과 함께 분사되는 액체 및 주위기체의 물리적 특성과 분사 특성에 따른 연구를 통하여 차량 도장면의 성능 향상과 액체의 미립화는 노즐의 형상과 함께 분사되는 액체 및 주위기체의 물리적 특

성과 분사압력에 따라 많은 영향을 받는다. 특히 액체의 분열에 의해 형성된 분무의 액적 크기와 속도는 노즐의 기하학적 형상에 의해 큰 영향을 받는다. 산업 전반에 활용되는 다양한 노즐 중 2-유체 노즐은 액체에 공기를 직접 충돌시켜 미립화를 형성하므로 보다 작고 균일한 분무를 얻을 수 있으며 공기량의 제어를 통해 액적 크기의 분포를 조절할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 액체 분열의 에너지원으로 작용하는 공기의 운동량이 낮은 영역에서 미립화 특성이 나빠지는 단점을 지니고 있기 때문에 2-유체 선회 분사 노즐에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다<sup>(1)</sup>.

또한, 이 등<sup>(2)</sup>은 2-유체 분사기는 공기의 운동에너지를 이용하여 미립화를 행하므로 비교적 낮은 압력의

(2008년 12월 8일 접수 ~ 2008년 12월 19일 심사완료)

<sup>†</sup>책임저자, 회원, 이중순 동명대학교

E-mail : jslee@tu.ac.kr

TEL : (010)3839-4000 FAX : (051)629-1679

공기로도 평균 분무입경이 작은 미세분무를 얻을 수 있고, penetration이 감소하며, 분무입자의 dispersion이 커서 빠른 증발 및 공기와의 혼합을 이룰 수 있다는 장점이 있다고 밝힌 바 있다.

2-유체 노즐은 액체와 기체의 충돌이 발생하는 위치에 따라 내부 혼합형과 외부 혼합형으로 구분하는데, 내부 혼합형의 경우에는 혼합 지점 하류의 유동상태에 따라 혼합 지점 상류의 유동이 영향을 받게 된다. 즉, 분사압력이 일정할 경우에 압력강하량의 변화에 따라서 기체와 액체의 공급 유량이 변하게 된다<sup>(3)</sup>.

선행 연구를 고려할 때, 분무 현상은 분무장을 결정 짓는 인자인 기체의 분사압력과 액상 도료의 분사압력 및 점도, 니들밸브의 열림 정도 등의 요인과 함께, 노즐의 설계 치수 등 여러 가지 인자의 영향을 받게 됨을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 분무장에 영향을 미치는 각종 인자 특성이 분무 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 2-유체 노즐을 설계제작한 후, 광폭면 분무를 위한 가능성을 확인하기 위한 목적으로 광학적 기법을 적용하여 분무특성을 확인하였다.

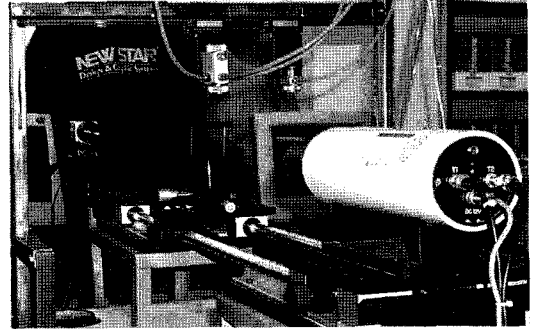


Fig. 1 Photograph of an experimental apparatus

치와 계측장치의 구성은 노즐의 분무해석을 위한 분무 입자해석장치(particle motion analysis measuring system)와 이미지 취득을 위한 CCD 카메라, 분무장 모사를 위한 실험장치, 기체와 액체의 공급을 위한 공급제어장치, 전자밸브 제어장치 및 제어용 보드 등으로 구성하였다.

Figure 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 전경을 나타낸 것이다.

Figure 2는 연구에 사용된 PMAS의 개략도를 나타낸 것이다.

계측장치는 광지속시간이 50ns 인 레이저 광원과 렌즈, 필터, CCD 카메라, 이미지 보드 및 제어보드가 내장된 컴퓨터로 구성하였다.

광원은 충분한 광량을 가져야 하기 때문에 방전식

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치의 구성

2-유체 노즐의 개발과 분무 특성 확인을 위한 실험장

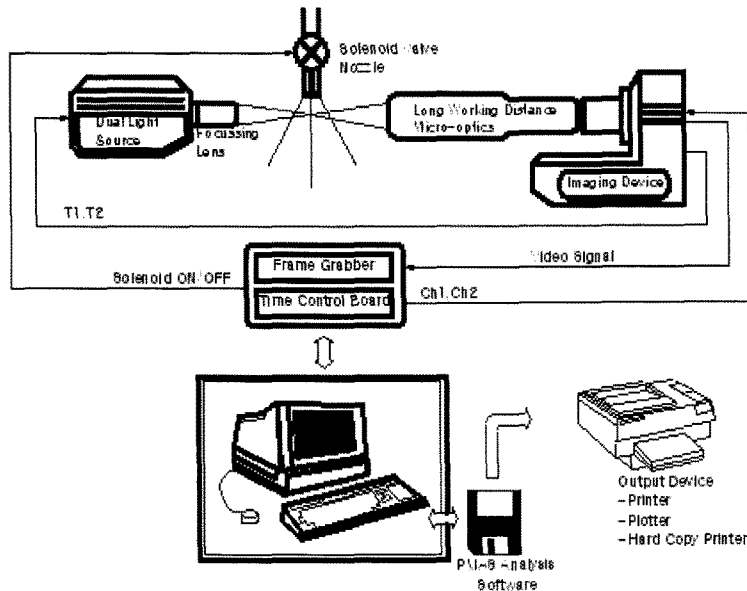


Fig. 2 Schematic diagram of particle motion analysis measuring system<sup>(4)</sup>

광원을 이용하는데, 본 연구에서는 광 지속시간이 50 ns 이고 스파크 간격이 1단위로 조절되는 2중 방전 광원 (dual exposure spark light source)을 사용하였다. 즉, 미소한 시간차를 두고 스파크가 2회 발광하여 입자(droplet)의 추적이 용이하기 때문에 동일 필름 상에 이중 노출을 통한 입자의 운동 속도 계측용 광원으로 적합하다.

화상 취득 장치(image frame grabber, MX-II)의 분해능은 512(H)×512(V)화소이고 30 frame/sec의 속도로 화상을 처리할 수 있으며, 실시간 제어장치의 트리거 모드(trigger mode)와 동기화시켜 희망하는 순간의 화상을 취득할 수 있다.

컴퓨터에 내장되어 있는 4채널 제어보드는 노즐의 분사개시 제어를 위한 기준신호로 사용하였고, 광원장치 및 화상취득장치를 실시간 제어한다. 또한, CCD에서 취득한 이미지상의 입자와 실제 입자의 크기를 동일하게 하기 위하여 사용한 렌즈와 초점거리에 대한 확대비를 계산하여 8~300이내의 입경 측정이 가능하도록 하였다.

분무입자해석장치를 통하여 얻은 이미지 내에 존재하는 액적의 크기는 2~300의 다양한 직경을 가진 보정용 레티클(reticle)을 기준으로 하여 계산하였다.

## 2.2 이론적 배경

### 2.2.1 분무평균입경

액체의 분무는 각각의 액적들이 분위기 기체중에 집단으로 존재한다. 노즐에서 분사되는 공기와 도포용 도료는 공기와 도료와의 충돌에 의해 분출되며 액주의 형성, 분열, 미립화 등의 과정을 거치면서 무화상태로 성장하기 때문에 그 입경의 크기는 다양하다<sup>(5)</sup>.

따라서 액적의 크기를 포괄적이고 대표성 있게 판단할 수 있는 지표로써 분무평균입경의 개념이 필요하다. 일반적으로 분무평균입경은 액적수, 지름, 표면적 및 체적 등의 일부를 조합하여 그 크기를 나타내는데, 일반화된 식은 다음과 같다.

$$D_{pq} = \left[ \frac{\sum N_i D_i^p}{\sum N_i D_i^q} \right]^{1/q} \quad (1)$$

$i$ 는 액적 크기의 급간을 나타내고,  $N_i$ 와  $D_i$ 는 각각 급간에서의 액적수 및 지름을 나타낸다.

$p$ 와  $q$ 는 상수이고, 그들의 합( $p+q$ )를 평균 입경의 차수라고 한다.

여러 가지 평균 입경의 정의 중에서 열 및 물질 전달과 관련하여 가장 많이 사용되는 것이 Sauter 평균입경이다. Sauter Mean Diameter(SMD)는 액적 침투, 열

이나 질량 전달현상을 포함하는 많은 작용들의 특성을 설명해 줄 수 있기 때문에 가장 일반적으로 사용된다. 이 값은 액적군의 총체적에 대한 총 표면적의 역수에 비례하므로 결국 분사된 액체가 주위 기체와 표면을 통해 접촉하기 위하여 얼마나 미립화되었는지를 보여주는 유용한 척도가 된다<sup>(6)</sup>.

일반식은 식 (2)와 같이 정의한다.

$$SMD = \frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2} \quad (2)$$

### 2.2.2 분무침투 깊이

분무침투 깊이(Spray Penetration depth)란 정지된 기체 내로 분사된 액체의 분무의 선단이 도달하는 최대 거리를 의미한다<sup>(4)</sup>.

이 거리는 분출되는 액체의 운동에너지와 주위 기체에 의한 공기역학적 저항의 상대적인 크기에 의해서 결정된다. 노즐로부터 분사되는 액체의 속도는 매우 빠르나 미립화가 진행되어 하류로 내려오면서 분사 액체의 전체 표면적이 증가하게 된다. 또한, 기체와 액체 사이의 마찰항력에 의해서 운동에너지의 소산이 일어나게 되며, 운동에너지를 주위 기체에 모두 전달하게 되면 액적들은 주위 기체의 유동을 따라 흘러가며, 중력이 작용하는 경우에는 그 영향을 받게 된다.

본 연구에서는 분무침투 깊이를 분무장 선단도달거리(Spray tip Penetration or Solid jet Penetration), 주분무장 도달거리(Main spray Penetration)와 반경방향 도달거리(Radial spray tip penetration)로 세가지 경우로 정의하고 분석하였다. 또한, 취득된 이미지를 전산 처리하여 분무의 최외곽선을 트레이서하여 유효 분무침투깊이로 정의하였다.

분무장 선단도달거리는 노즐의 끝 부분과 분무장 끝부분 사이의 거리를 의미하는 것으로 본 연구에서는 장치의 제한으로 인하여 460 mm 영역 이내에서 이미지의 취득을 수행하였다. 주분무장 도달거리는 노즐의 끝부분과 주와류 분무장 끝부분 사이의 거리이며, 반경방향 침투깊이는 와류에 의해 생기는 분무장의 최대 폭으로 정의하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 노즐의 거시적 분무 특성

Figure 3은 분무 특성을 확인하기 위하여 계측 가능

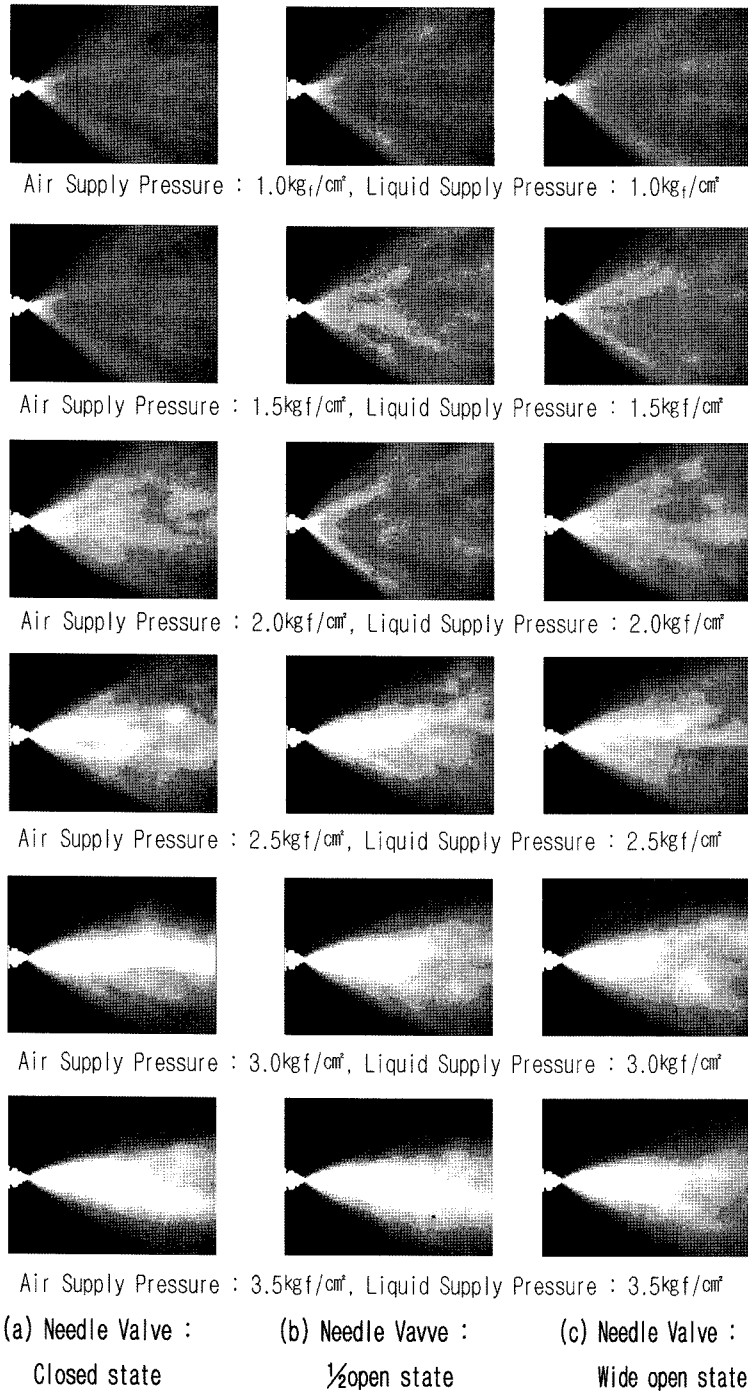


Fig. 3 Images of spray structure at each condition

한 범위 내에서 거시적 촬영을 한 결과를 나타낸 것이다. 이미지는 제어용 컴퓨터로부터 지속적인 분무가 일어날 수 있도록 신호를 인가한 상태에서 자연광을 이

용하여 CCD 카메라로 취득한 것으로, 가로와 세로의 길이는 460x360 mm이며 분위기 온도와 압력은 각각 상온, 상압인 조건이다.

이미지를 통하여 분무 액적의 분산도, 분무의 침투 거리, 분무각 등에 대한 정보를 확인할 수 있음은 물론, 분무의 형상은 분무선단(leading edge), 원추영역(cone region), 미단영역(trailing edge), 와류영역(vortex cloud

region) 과 같은 4가지 분무영역으로 이루어짐을 볼 수 있다<sup>(7)</sup>.

분무현상에 있어서 분무의 도달거리란 정지된 기체 내로 분사된 액체 분무의 선단이 도달하는 최대 거리

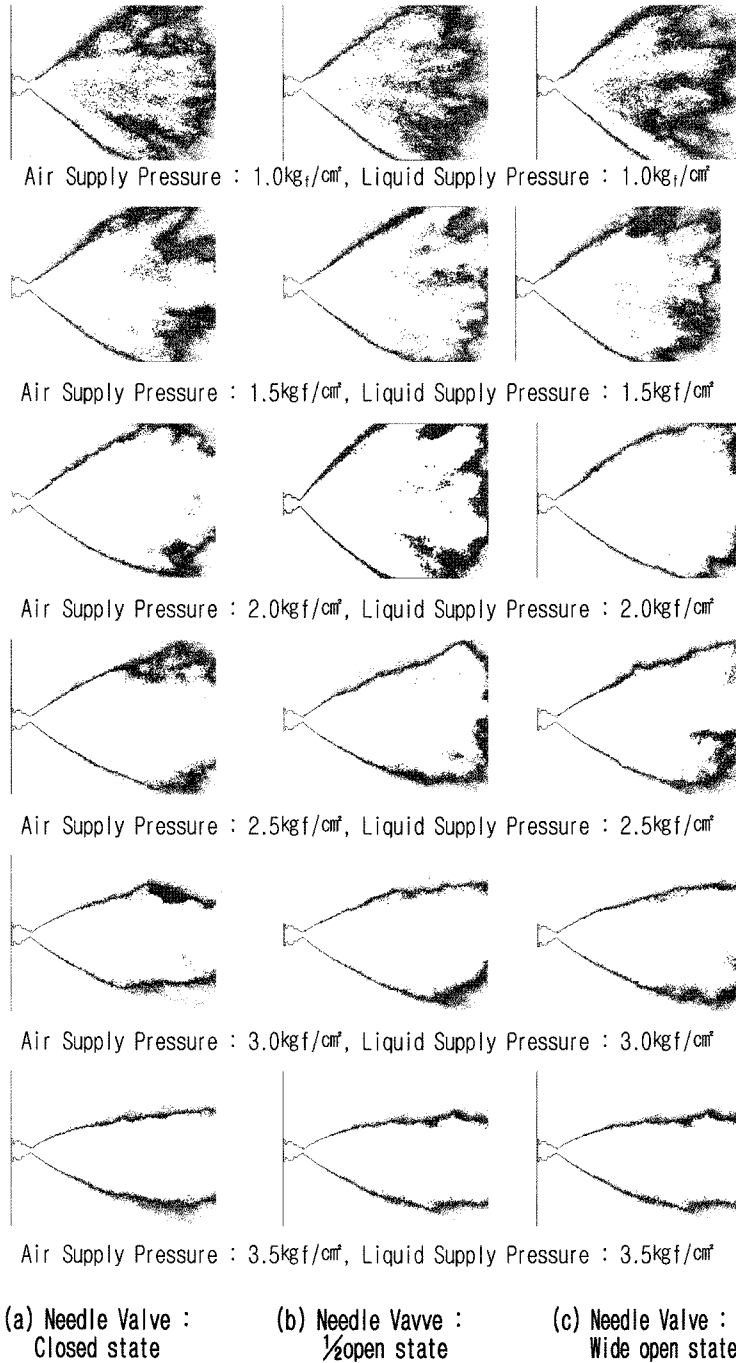


Fig. 4 Conversion images of spray structure at each condition

를 의미하는데, 일반적으로 침투깊이는 분출되는 액체의 운동에너지와 주위 기체에 의한 공기역학적 저항의 상대적인 크기에 의해서 결정되는 요소이다.

이미지로부터 분무의 실제 현상을 확인해 보면, 기체의 공급 압력이 0.01 kPa 이상인 영역에서부터 정상적인 분무가 이루어짐을 알 수 있으며, 기체의 공급압력이 증가함에 따라 관통도는 증가하는 반면, 분사각이 작아지는 현상을 볼 수 있고, 동일한 기체의 공급압력 하에서는 니들밸브가 열릴수록 액주의 길이가 짧아짐과 동시에 분열이 빨리 일어나는 현상을 확인할 수 있다.

Figure 3의 이미지를 이용하여 분무의 각도 계측을 하기에는 다소 무리가 있다. 그 이유로는 기체의 공급압력이 증가함에 따라 노즐의 분무 속도는 더욱 증가하게 되고 이로 인해 분무 외곽의 입자가 더욱 미립화되는 일반적인 현상에 기인하기 때문이다.

분무 각도의 명확한 해석을 위하여 Fig. 3의 이미지를 히스토그램 평활화(histogram equalize)처리하여 취득한 분무 최외곽의 입자만을 추적한 결과를 Fig. 4에 제시한다. 이미지를 살펴보면, 기체의 공급압력이 증가함에 따라 분무 각도가 줄어드는 현상을 확인할 수 있는데, 이는 노즐의 중앙부를 통한 기체의 분출속도가 증가하는 요인과 함께 이로 인해 분무장 주변의 주위 공기가 강하게 분무장쪽으로 유입되는 현상에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 2-유체 분사기를 사용할 경우에 적정 이상의 기체의 공급 압력은 분무의 관통도는 증가시킬 수 있지만, 분사각도를 확장할 수 없는 결과를 초래함을 확인할 수 있다. 또한, 이미지에서 볼 수 있는 바와 같이 분무 외곽 부분에 검은 색으로 표현되는 부분은 도포용 액체의 분무가 확실하게 일어나지 못하는 부분을 의미하는 것으로 이는 분무장 영역에서 밀도의 분포가 차이가 날 수 있음을 확인할 수 있다.

Figure 5는 기체의 분사압력에 따른 노즐의 분사각도를 나타낸 것이다. 일반적으로 분무각이란 노즐의 중심이 있는 축방향 위치에서 분무의 양측 외곽 지점과 노즐의 출구를 이은 두 직선 사이의 각도를 말한다<sup>(4, 5, 7)</sup>.

본 연구의 영역에서는 2-유체 노즐의 광폭면에 대한 도장 능력을 확인하는 것이 중요한 요소이며, 실험 결과로부터 기체의 공급 압력이 증가함에 따라 분사각은 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

Figure 6은 노즐의 관통도를 확인하기 위하여 기체의 공급압력에 따른 분무의 침투 깊이를 나타낸 것이다. 여기서, 분무의 침투 깊이란 정지된 기체 내로 분사된 액체 분무의 선단이 도달하는 최대거리를 의미하는데

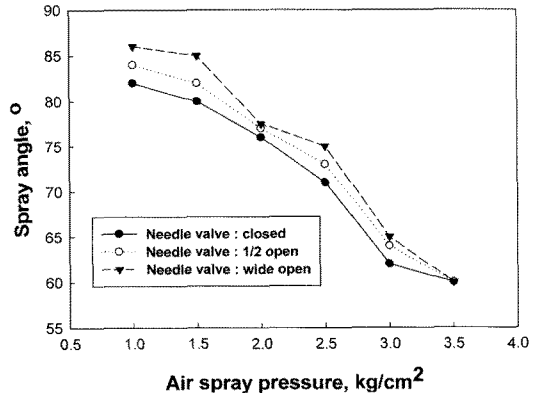


Fig. 5 Relations between air spray pressure and spray angle

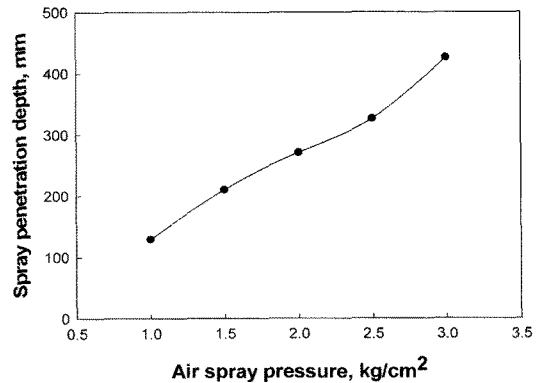


Fig. 6 Relations between air spray pressure and spray penetration depth

침투 깊이는 분출되는 액체의 운동에너지와 주위 기체에 의한 공기역학적 저항의 상대적인 크기에 의해서 결정되어진다<sup>(8)</sup>.

본 연구에서는 취득한 이미지로부터 분무가 일어나지 않는다고 판단되는 부분을 배제한 부분까지의 거리로 판단하였다. 즉, Fig. 4의 이미지에서 검은 색으로 표현되는 부분이 없는 부분까지의 거리를 말하는 것으로 이 영역은 비교적 밀도의 분포가 균일한 영역인 것으로 판단하였다.

### 3.2 노즐의 미시적 분무 특성

거시적 분무특성의 고찰 결과로부터 적절한 분무 조건이라고 판단되는 경우인 기체의 분무압력 0.01 kPa, 0.015 kPa, 0.02 kPa인 조건에 대하여 미시적 분무 특성을 확인한 결과를 Fig. 7에 나타낸다.

입자의 계측 위치는 적용하고자 하는 장비의 특성과 분무각 및 분무침투깊이를 고려하여 2-유체 노즐 선단

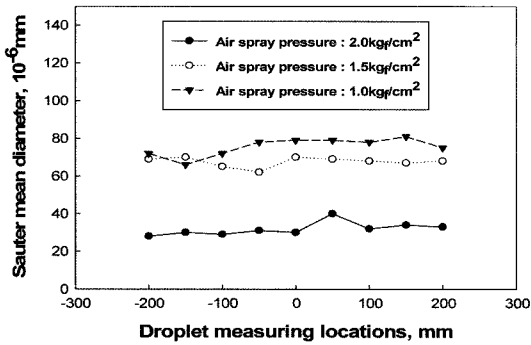


Fig. 7 Relations between sauter mean diameter and air spray pressure at each measuring locations

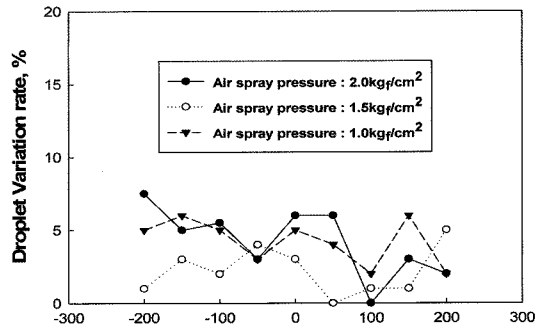


Fig. 8 Relations between sauter mean diameter variation rate and air spray pressure at each measuring locations

으로부터 200 mm 떨어진 지점을 선택하여 분무 중심으로부터 좌·우 방향으로 50 mm 간격으로 이미지를 취득하였다.

Figure 7과 같은 결과로부터 기체의 분무 압력이 증가함에 따라 분무 입자의 평균 입경이 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 위에서 고찰한 거시적 촬영의 결과와 동일한 경향을 보인다.

동일한 기체 분무 압력 조건에서 계측 위치에 따라 평균 입경이 약간의 차이가 남을 볼 수 있는데, 이는 실험적 연구에 따른 오차 범위 이내인 것으로 판단되

며, 전반적으로 입도의 분포는 고르게 나타나는 것으로 판단할 수 있다.

기체의 분무 압력이 0.02 kPa인 조건에서는 평균 30 μm, 0.015 kPa인 조건에서는 평균 65 μm, 0.01 kPa인 조건에서는 평균 75 μm 정도의 입자 분포를 보이고 있는데, 동 조건은 에어 스프레이 도장법을 이용할 경우의 입자 범위 내에 적합한 것으로 사료된다. 또한, 분무시에 발생할 수 있는 분무 도막 두께의 차이를 최소화하기 위해서는 균일한 분무 성능과 함께 입자의 불균율이 최소화되어야 할 필요가 있다. 이를 확인하기

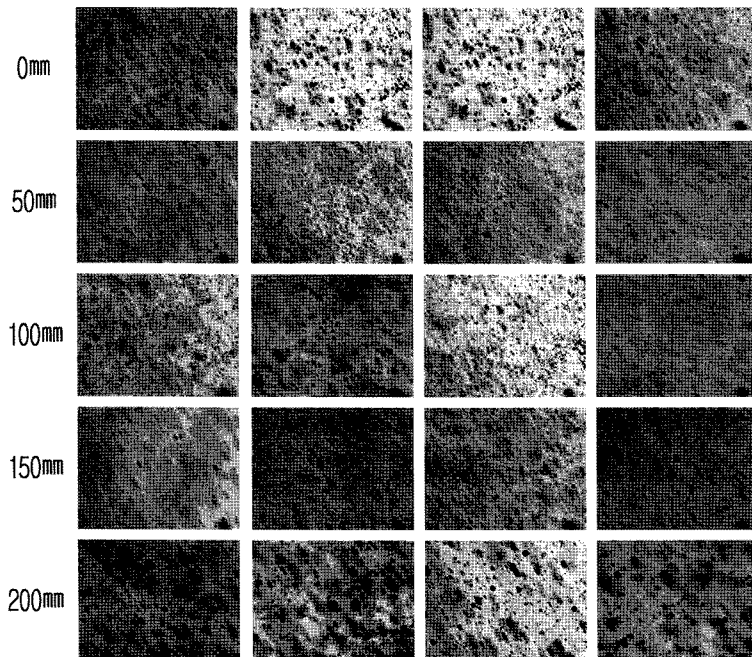


Fig. 9 Micro images of spray at each locations using Particle Motion Analysis System

위하여 동일 조건에서 다수회의 이미지를 취득한 결과로부터 구한 분무 입자의 변동률을 Fig. 8에 나타낸다.

Figure 8에서 볼 수 있는 바와 같이 기체의 분무 압력과 측정 위치에 따라 약간의 차이는 있지만 대체로 7% 이내의 변동률을 보이고 있는데, 해당 값은 도막 두께의 불균일 정도에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

기체의 공급 압력이 가장 높은 0.02 kPa인 경우에 비하여 기체의 분무 압력이 0.01 kPa인 조건과 0.015 kPa인 조건에서 다소 안정된 입자 분포를 보이는데, 이는 기체의 분무 압력이 낮기 때문에 분무발달이 짧은 시간 내에 이루어지는 현상에 기인한 것으로 보인다. 이러한 결과들로 미루어 볼 때, 2-유체 분무의 경우에 필요 이상의 기체 공급 압력을 가하는 것은 바람직하지 못한 것으로 판단된다. 한편, 제시 외의 조건인 노즐 선단으로부터 150 mm 영역에서도 동일한 현상을 보임을 확인하였다.

Figure 9는 미시적 이미지 취득 결과를 나타낸 것으로, 각 화상의 가시면적은 3.3 mm×2.4 mm이다.

이미지는 노즐의 분사각 중심축(0 mm 위치)을 기준으로 우측 반경 방향으로 50 mm 간격으로 위치를 이동시키면서 촬영하였다. 분무의 거시적 해석을 통하여 액적의 분산도와 분무침투깊이 및 분사각 등에 대한 정보를 확인할 수 있었으며, 이를 기초로 미시적 거동을 확인하여 분무입자의 액적 크기 변동률 등과 같은 미립화 특성을 고찰하였다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 분무장의 각종 특성인자가 분무의 특성에 미치는 영향을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다<sup>9)</sup>.

1. 분무 기체의 적정 분사압력은 0.015~0.02 kPa, 액상 도료의 공급 압력은 0.01 kPa 정도가 적절한 것으로 판단되며, 설정 압력은 밸브의 작동시 발생하는 감압현상에 따른 보정을 하여야 한다.

2. 니들 밸브 열림 정도는 노즐 선단에서 분무 초기에 일어나는 액주의 길이에 영향을 미치며, 후적 방지를 위하여 액체 공급 종료후에 미세시간 기체 공급을 하여야 한다.

3. 분무침투 깊이는 분무기체의 공급압력에 따라 커지며, 기체의 분사압력이 적정할 경우에 유효한 분사각도는 85°±5° 정도이며, 분무 면적은 기체의 분사압력 및 분무 선단으로부터의 거리 및 니들밸브의 양정에 따라 350±50 mm의 값을 보였다.

4. 2-유체 노즐의 이동속도는 기체의 분무압력, 도장의 두께 및 코팅용 액체의 점도 등에 따라 차이는 있지만, 일반적으로 0.2~0.3 m/sec 정도로 피도장면과 수평으로 이동하며 도장하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

#### 참고문헌

- (1) 김덕진, 이지근, “이중공기 공급 2-유체 노즐의 선화 각 변화에 따른 미립화 특성”, 한국액체미립화학회지, 제13권 제3호, 2008, pp.126~133.
- (2) 이용표, 김승수, “4행정 직접분사식 성층화 엔진용 2 유체 분사기의 성능에 관한 연구”, 한국자동차공학회 추계학술대회논문집(I), 1994, pp.50~55.
- (3) 이상용, “액체의 미립화”, 민음사, 2000, pp.1~45.
- (4) 신영진, 이준순, 윤수환, 정성식, 하종률, “분위기 조건이 직접분사식 인젝터의 미립화에 미치는 영향”, 한국자동차공학회 부산울산경남지부 추계학술대회 논문집, 2001, pp.54~63.
- (5) John B. Heywood, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill International Editions, 1989, pp.517~566.
- (6) 이상용, “액체의 미립화”, 민음사, 2000, pp.109~145.
- (7) L. W. Evers, Characterization of the Transient Spray from a High Pressure Swirl Injector, SAE Technical Paper 1994, No.940188.
- (8) 이상용, “액체의 미립화”, 민음사, 2000, pp.240~268.
- (9) 이준순 “광폭면 분무를 위한 2유체 노즐의 분무 특성에 관한 연구”, 한국자동차공학회 부산·울산·경남지부 추계학술대회 논문집, 2008, pp.29~35.