

〈논 문〉 SAE NO. 97370066

PDPA를 이용한 도장의 최적 조건에 관한 실험

Experimental Study for the Optimum Conditions of Painting Using Phase Doppler Particle Analyzer

황 승 식*, 김 종 철**, 하 옥 남***, 전 운 학****
S. S. Hwang, J. C. Kim, O. N. Ha, U. H. Chun

ABSTRACT

The automotive industry as the major industry of the nation has affected both society and economy since the automobile was invented, and the main technique that help to performance improvement of the automobile has been developed. But, the painting technique lags behind the main technique of the automobile because that was neglected. Specially, we can say that in case of the painting technique of the automobile of our nation is so weak situation.

After we changed the injecting pressure, the composition ratio (paint, hardener, thinner) and the injecting flow rate from spray-gun by PDPA, we studied the character of the injecting velocity and droplet size, and found the fittest condition.

So, we got the following result to help mending paint technique of automobile surface. We could know the following fact from the experiment result. When it does mending paint of automobile, there is most suitable that to inject the paint as injecting pressure 200~300 kPa and to inject the ratio of paint 10 : 1 : 1 when the fluid adjective knob valve of spray-gun is open full.

주요기술용어 : Injecting pressure(분사 압력), Composition ratio(조성비), Injecting flow rate(분사 유량), Injecting droplet velocity(분무 액적 속도), Droplet size(액적 크기)

기 호 설 명

- * 국민대학교 기계공학과 대학원
- ** 국립 충청산업대학교 기계공학과 교수
- *** 정희원, 조선대학교 기계공학과 교수
- **** 정희원, 국민대학교 기계공학과 교수

- D : Droplet diameter[μm]
- D_{10} : Arithmetic mean diameter[μm]
- D_{32} : Sauter mean diameter[μm]

d_e	: Laser beam diameter at lens[mm]
d_p	: Measurement volume height[μm]
d_w	: Measurement volume waist[μm]
f	: Doppler difference frequency[Hz]
f_d	: Focal length of droplet[mm]
f_o	: Focal length of lens[mm]
f_s	: Shift frequency of laser beam[Hz]
L	: Distance from droplet to detector[μm]
l_p	: Measurement volume length[μm]
n	: Number of particles
$R1$: Detector 1 of receiver
$R2$: Detector 2 of receiver
S	: Projected Fringe spacing [μm]
S'	: Detector spacing [μm]
U	: Velocity of particle [m/s]
\overline{U}	: Mean velocity of particle [m/s]
V_p	: Measurement volume [μm^3]
δ_f	: Fringe spacing [μm]
θ	: Angle degree between beams [degree]
λ	: Wave length of laser beam [nm]
ϕ	: Phase difference

1. 서 론

20세기 후반에 들어서면서 자동차 업계는 환경 오염의 엄격한 통제 아래서도 자동차 표면의 노후화 방지 및 유지 보수를 위하여 필연적으로 요구되는 도장에 대한 관심이 증가되고 있다. 오늘날 가장 보편적으로 사용하는 도장 방법으로는 표면에 막을 만들어 표면의 노후화를 방지하는 방법으로 페인트를 사용하는 방법이 가장 많이 사용되고 있다.¹⁾

현재 도장의 외관 품질 향상 이외에도 도장 업계는 지구 환경 보전과 에너지 절감이라는 과제를 갖고 있다. 이러한 과제를 해결하기 위해 페인트를 스프레이 건에 넣어 분사시키는 장치에서 분무 성능에 영향을 미치는 분무 특성의 연구가 필요로 되었다.²⁾ 액체의 분무는 분사 압력, 분사 노즐, 분사 각도, 분사 유량, 조성비, 사용 유체의 물성치 등에 따라 분무 특성이 결정된다. 그러나, 페인트의 분무 입자

의 속도, 크기 등을 정확히 측정할 수 있는 장비가 없었기 때문에 분무 특성의 연구에 어려움이 있다. 그러므로, 액체의 유동에 영향을 미치지 않고 위상 도플러(Phase-Doppler)의 원리를 이용하여 액체 분무 입자의 속도, 크기 등을 측정할 수 있는 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 측정 장치³⁾로 사용하였다.

본 연구에서는 분사 압력 및 조성비(페인트:경화제:신너)와 분사 유량을 변화시켜 페인트 분무시의 속도와 입자 크기의 특성에 대하여 연구하여 최적의 조건을 알아봄으로써 이를 실용화하여 자동차 표면의 보수 도장 기술에 도움이 되고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 이 론

2.1 PDPA장치의 작동 원리

PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)장치는 레이저 도플러 유속계(LDV: Laser Doppler Velocity)의 확장 형태로서 유체 분무 중의 미립자에 의해 산란된 빛의 도플러 편이(Doppler shift)를 이용한다. 일반적으로 광원과 관측기가 상대 운동을 하는 경우에는 도플러 효과에 의한 파장 및 주파수의 변화가 발생한다. LDV는 이러한 원리를 이용한 것으로서, 유체 중에 존재하는 산란 입자에 평행성, 단색성, 가간섭성이 뛰어난 레이저 빔을 측정하고자 하는 위치에 교차시키면, 주축에 평행한 격자(fringe)를 갖는 타원형 체적의 측정 체적(measuring volume)이 형성되며, 이 부분을 지나는 입자에 의해 산란된 두 개의 산란광을 서로 광중합하여 나온 도플러 편이차를 이용하여 유속을 측정한다. 입자의 크기 측정은 fringe공간을 통과하는 입자가 광검출기에서 발생하는 도플러 주파수 차이로 생기는 간섭 줄무늬의 사이를 통과하는 신호의 위상차를 비교함으로써 측정한다.

2.1.1 액적의 속도 측정

PDPA장치를 이용한 속도 측정은 LDV의 원리를 그대로 이용한 것으로서 강도가 거의 비슷한 두 개의 레이저 빔을 서로 교차시켜 간섭 무늬를 형성하는 2중광 방식(dual beam mode)

으로 작동한다. 전체적인 속도 분포는 측정 할 수 없고, 어떤 특정 범위 대(Band)의 속도 분포만을 측정할 수 있다는 단점은 있지만 유체의 속도를 측정하는 장비로 그 우수성을 입증 받고 있다.

파장과 위상이 같은 2개의 레이저 빔을 교차시키면 Fig.1에 나타난 것과 같이 빔의 교차부에 간섭 줄무늬(Interference fringe)가 발생한다. 입자가 간섭 줄무늬의 밝은 부분에 있을 때에는 산란광이 강하고, 어두운 부분에 있을 때에는 산란광이 약하게 되어, 이 산란광의 변화 주기에서 입자의 이동 속도를 알 수 있다. Fig.2에서 간섭 줄무늬 간격을 δ_f 라 하고 산란

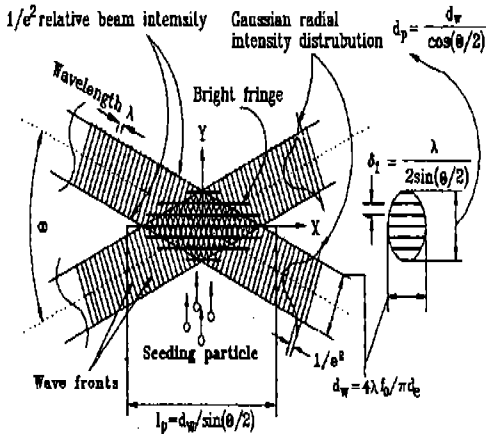
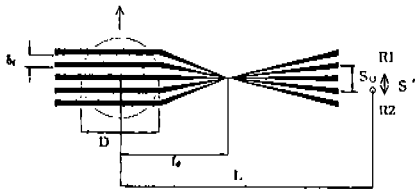


Fig.1 Fringe Model of Velocity Measurement



- D : Diameter of droplet
- f_0 : Focal length of droplet
- L : Distance from droplet to detector
- b_f : Fringe spacing
- S : Projected fringe spacing
- S' : Detector spacing
- R1 : Detector 1 of receiver
- R2 : Detector 2 of receiver

Fig.2 Fringe Model of Phase Measurement

광의 주파수 변화를 f 로 하면, 간섭 줄무늬의 수직 방향(Y방향) 입자의 속도 성분 U 를 다음 식으로 구할 수 있다.³⁾

$$U = f \cdot \delta_f$$

여기서, 빔의 교차각을 θ , 레이저 파장을 λ 라 하면, 간섭 줄무늬 간격 δ_f 는

$$\delta_f = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)}$$

Y 방향 입자의 속도 성분 U 는

$$U = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} f$$

이다. 이 때 θ , λ 를 일정하게 두고 도플러 주파수 f 를 측정하면 입자 속도를 구할 수 있다. 또, 빔이 교차하는 부분에서는 측정 체적이 생기는데, 이 측정 체적의 길이를 l_p 라 하고, 높이를 d_p , 폭을 d_w 로 표시하면 다음과 같다.

$$l_p = \frac{d_w}{\sin(\theta/2)}$$

$$d_p = \frac{d_w}{\cos(\theta/2)}$$

$$d_w = \frac{4 \lambda f_0}{\pi d_e}$$

그리고, 측정 체적 V_p 를 이들의 곱으로써 나타낼 수 있다.³⁾

$$V_p = \frac{\pi}{6} (l_p \cdot d_p \cdot d_w)$$

여기서, θ 는 빔사이의 교차각이며, f_0 는 렌즈의 초점 거리, λ 는 레이저의 파장, d_e 는 렌즈에서의 빛의 직경이다. 측정 체적은 초점 거리에 의해서 변화하게 된다. 그러므로, 초점 거리가 길어지면 렌즈에서부터 나온 빛의 직경

은 큰 측정 체적을 만들 수 있다.

두개의 빔의 교차점에서 만들어진 간섭 줄무늬의 형상은 움직임이 없다. 그러므로, 변조된 빛의 주파수는 입자 속도에 대한 정보를 제공하지 못한다. 이러한 불분명한 문제들을 해결하기 위해서는 투사되는 빛에서 약간의 주파수 변이가 교차하는 두 개의 빔중 어느 한쪽에 있어야 한다. 측정 체적 속을 이동하는 입자는 빛을 분산시키는데, 여기서 변조 주파수(Modulation frequency)와 변이 주파수(Shift frequency)의 차이가 속도에 비례하게 된다. 따라서 간섭 줄무늬 이동에서 반대 방향의 이동은 변조 주파수를 증가시키는 반면에 같은 방향의 이동은 변조 주파수를 감소시킨다. 정확한 속도 측정의 역학적 범위는 변이 주파수에 의해 결정되고, PDPA장치에서 변이 주파수는 변조 주파수를 Bragg cell을 이용한 40MHz의 주파수 변이에 의해 생성된다.

측정된 속도는 신호 처리기에서 계산이 된후, 모두 합산하여 평균값과 표준 편차로 나타내어지고, 이것은 히스토그램 형태로 보여지게 된다. 이때의 평균값과 표준 편차의 식은 다음과 같다.³⁾

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}$$

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}{n-1}}$$

여기서, \bar{U} 는 평균 속도를 나타내며, U_i 는 임의의 입자 속도, n 은 측정된 입자 개수를 나타낸다.

2.1.2 액적의 크기 측정

PDPA장치를 이용한 입자의 크기 측정에는 3개의 수광기 검출기에서 받아들인 신호의 위상차를 비교하여 액적 크기를 측정한다는 것이 특징으로, 측정 원리는 Fig.2의 간섭 줄무늬 모델(Fringe model)을 이용해 설명할 수 있다. 측정 체적에서 간섭 줄무늬가 광선이라 생각하면

그것들은 측정 체적을 통과하는 투명한 구형 액적이 렌즈의 포커싱(Focusing)작용을 하여 공간으로 투영된다. 고정된 광검출기에서는 도플러 주파수로 인해 발생하는 밝고 어두운 간섭 줄무늬가 검출된다. 이때 두개의 검출기 R1, R2는 같은 주파수를 가지지만, 검출기 사이의 거리 S' 와 투영된 Fringe 사이의 거리 S 의 비에 비례하는 상대적인 위상차를 가지게 된다. 측정 체적에서 먼 거리에 투영된 Fringe사이의 거리 S 는 액적의 초점 거리 f_d 에 반비례하고, 투명하고 구형인 액적에 대한 이 초점 거리가 액적 직경 D 에 비례한다. 따라서, 측정된 위상차 ϕ 가 액적 직경에 비례하게 된다.

위상 변이와 입자 직경 사이의 정확한 관계를 계산하기 위해서는 빛이 분산하는 유형을 고려하여야 한다. 빛의 분산 과정을 광선 광학(Ray optics)에 의해 반사, 굴절, 2차 굴절, 진행 방향으로의 회절 등으로 나눌 수 있다. 다양하게 분산된 광선의 광학적 검출의 길이를 고려하므로써 주어진 광학적 조건에 대한 위상대 지름 곡선을 산출할 수 있다.

측정된 직경은 데이터 처리 시스템에서 산출적인 평균 직경(D_{10})과 면적에 대한 체적비(Sauter 평균 직경- D_{32})로 계산이 된다.³⁾

$$D_{10} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$$

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2}$$

여기에서 d_i 는 임의의 입자 직경이며, n 은 측정된 입자 개수이다. D_{10} 으로 측정된 모든 액적의 직경은 가중치 없이 계산이 되므로 반드시 분포의 중심에 위치하지는 않는다. 그러나 D_{32} 에서는 분포가 높은 부분 즉, 많이 측정된 부분에 가중치를 줌으로써 액적의 직경이 결정되기 때문에 일반적으로 사용되는 입자의 크기는 D_{32} 가 많이 사용되고 있다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

실험 장치는 페인트를 분사할 때 분사된 페인트의 속도와 크기를 측정할 수 있는 PDPA 장치와 페인트를 분사하는 분사 실험 장치로 나누어진다. 실험 장치의 개략도는 Fig.3에 나타내었다.

3.1.1 PDPA 장치

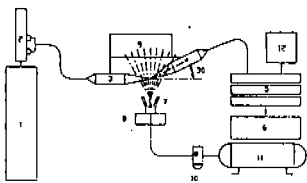
PDPA 장치는 레이저 생성 부분, 광학 부분, 신호 처리 부분, 데이터 처리 부분으로 구성되어 있다. 레이저 생성 부분은 미소한 주파수 편이량의 측정 및 작은 측정 체적을 얻기 위해서 가간섭성, 단색성, 평행성 등이 우수한 레이저 빔이 많이 사용되며, 다양한 속도 성분 및 후방 산란광에 의한 속도 측정시 충분한 빛의 세기를 낼 수 있는 Ar-Ion Laser가 사용된다. 레이저 빔 단면의 세기 분포를 나타내는 Transverse Mode와 레이저 발생기의 Optical cavity를 구성하는 두 개의 Mirror 사이의 간격에 관계되는 Longitudinal Mode가 있는 것이 특징이다. PDPA 측정시에는 공간 분해 능력 및 Data Rate를 증가시키기 위하여 Gaussian 모드가 필요하고, 광학 부분은 광 분리기(Beam splitter), 송광기(Transmitter), 수광기(Receiver)로 구성되어 있으며, 초점거리 300 mm의 focusing lens를 사용하였다. 광학 부분의 조합에 의하여

레이저가 측정하려는 구역으로 들어가게 되며 측정하려는 신호를 정확히 받을 수 있다. 송광기에서 보내어진 4개의 레이저 빔은 한 초점에서 모이게 되며, 이곳에 측정 체적이 생기게 된다. 측정 체적에서 측정 각도를 30° 방향(일반적으로 30° ~ 45° 사이의 각도를 둔다.

Fig.3참조하여 수광기(Receiver)를 설치하여 도플러 격발(Doppler burst) 신호를 받게 된다. 측정된 신호는 신호 처리계로 들어가서 이산화 푸리에 변환(DFT: Discrete fourier transform)으로 처리되게 된다. 광원은 파장이 514.5nm (Green beam), 488.0nm (Blue beam), 476.5nm (Violet beam)인 Ar-ion Laser(최대 출력 5W)를 사용하였으며, 실험시 사용 출력은 2W로 하였다. 측정에 사용한 PDPA 장치는 2차원 측정 장비로서 녹색 빔과 청색 빔만을 사용하였다. 3차원의 경우에는 보라색 빔까지 사용하여 각각 3개의 파장을 가진 빔을 이용한다. 레이저 생성 부분에서 생성된 레이저는 광학 부분으로 들어가게 되며, 레이저 원빔은 4개의 빔(Green, blue 각 2쌍)으로 분리되게 된다. 여기서 각각 한 개의 빔에 40MHz의 변조를 하여 액적의 이동 방향을 측정하게 된다. 실제 시간 신호 분석기(RSA: Real-time signal analyzer)로 처리된 신호는 컴퓨터로 보내어지게 되고 여기서 산술적인 계산이 이루어지게 된다. 계산된 수치는 관측자가 히스토그램 형태 또는 수치적 형태로서 모니터를 통해 볼수 있게 된다. 그리고, 오실로스코프(Oscilloscope)를 신호 처리기에 설치하여, 여기서 측정된 파형을 관측할 수 있다. 오실로스코프에서 측정되는 신호는 PDPA 장치의 RSA상의 격발 조건을 조정하는데 사용된다.

3.1.2 분사 실험 장치

분사 실험 장치는 도장 작업중 매우 중요한 역할을 차지한다. 분사 실험 장치는 공기를 공급하는 압력 발생 장치, 일정한 압력을 유지할 수 있도록 조절하는 압력 조절기와 분사를 담당하고 있는 스프레이 건을 케이블로 연결한 것이다. 사용된 장비의 제원은 Table 1에 나타내었다.



- | | |
|---------------------------|------------------------|
| 1. Laser | 7. Spray gun |
| 2. Fiber drive | 8. Paint cup |
| 3. Transmitter | 9. Tranverse |
| 4. Receiver | 10. Pressure regurator |
| 5. Signal processor | 11. Compressor |
| 6. Data management system | 12. Osilloscope |

Fig.3 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

3.1.3 스프레이 건

스프레이 건은 압축 공기의 힘으로 도료를 분무하는 것으로서 Fig.4와 같은 구조로 되어 있다. 방아쇠를 가볍게 당기면 압축 공기만이 분출되고 다시 방아쇠를 당기면 니들 밸브가 개방되어 노즐에서 도료가 분출되며 캡에서 나오는 공기로 인하여 도료는 보다 가는 입자가 되어 표면에 도장된다.

스프레이 건은 공기 캡의 방향에 따라서 페인트가 종(縱) 또는 횡(橫)의 방향으로 분사가 된다. 공기 캡에는 5개의 노즐이 있다. 5개의 노즐 중에서 중앙에 위치한 것은 페인트가 분리되는 곳이며, 그 옆에는 분무화 공기를 분출 방향으로 보내 주는 2개의 공기 노즐이 있다. 이때 나오는 공기가 선단부에 진공력을 형성한다. 그리고 여기서 나오는 페인트의 모양은 원형의 패턴을 가지고 있으며, 양측면 부분에는 공기의 진공력으로 분출 방향으로 분출되는 페인트를 양옆에서 간섭하여 원형의 패턴을 타원

형의 패턴으로 만드는 2개의 공기 노즐이 있다. 양측면 부분에서 분출되는 공기는 분사 각도 조절 밸브의 조정에 따라 분출되는 공기의 양이 변화하여 원형이나 타원형의 패턴을 만들 수 있다. 타원형의 패턴을 형성함으로써 효율적인 도장(더스트의 양이 적음)이 가능하며, 표면의 도장 상태도 좋게 된다.

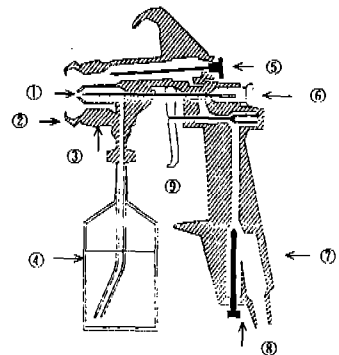
본 실험에 사용된 페인트는 투명 페인트(레탄P-G3), 신나는 레탄 P-G3 페인트 전용 신너를 사용했다. 경화제도 역시 레탄 P-G3 페인트 전용 경화제를 사용했다.

3.2 실험 방법

본 실험은 스프레이 건으로부터 분사되는 페인트의 분무 조건 변화에 따른 페인트의 분무 특성을 알아보는 실험이다. 분무 조건은 크게 3가지, 첫째 분사 압력의 변화, 둘째 페인트의 조성비 변화, 셋째 페인트의 유량 변화로 나누어 각각에 따른 분무 특성을 알아 보았다. 이 세 가지 실험에서 공통으로 사용된 스프레이 건은 에어 캡을 횡(橫)방향으로 두어서 페인트의 패턴 모양이 종(縱)방향으로 분무되도록 하였다. Fig.5에서 보듯이 분사 각도 조절 밸브를 조정하여 패턴 모양이 60°로 분무되도록 하고, 60°로 분무된 페인트를 측정하기 위해 분사 노

Table 1 Specifications of Experimental Instrument

Instrument	Specification
Spray gun	Model : W-88-15K5S IWATA Co., Japan Fluid nozzle orifice size : 1.5 mm Airconsumption : 165 l/min (at required pressure) Required air pressure : 200~300 kPa Paint output : 0.045~0.171 l/min
Pressure regulator	Model : B2019-2C-P, CKD, Japan Range : 0~1 MPa
Compressor	Model : SM-200, Hanshin electric, Korea Rated output : 0.75 kW Number of revolution : 1710 rpm Rated frequency : 60 Hz



- ① Nozzle(tip) ② Air cap ③ Settle ring ④ Paint Tank
- ⑤ Injection control valve ⑥ Delivery control valve
- ⑦ Handle ⑧ Air control valve ⑨ Trigger

Fig.4 Structure of Spray Gun

즐의 중심에서 아래 30° 방향만을 측정한다

액적이 측정되는 지점(레이저 빔이 서로 만나는 부분) 즉, 측정 체적이 스프레이 건의 노즐 중심 축으로부터 수직으로 멀어짐에 따라 페인트가 어떠한 분포를 나타내는가를 알기 위해 스프레이 건의 노즐 중심에서 수직한 아래 방향으로 단계를 나누어서 측정한다.

좌표계는 스프레이 건 노즐의 중심에서 액적이 정면으로 분사되는 방향을 X축으로 하고, 아래로 분사되는 방향을 Y축으로 정하도록 한다. 그리고 X축으로 나가는 속도를 X방향 속도(앞 방향을 (+)방향으로 함), Y축으로 나가는 속도를 Y방향 속도(아래 방향을 (+)방향으로 함)라고 명칭 한다

3.2.1 분사 압력 변화에 따른 액적의 측정 방법

이 실험의 목적은 스프레이 건의 분사 압력을 변화시키기에 따라 측정 체적을 통과하는 액적의 분무 특성을 알아보는 것으로서 스프레이 건의 노즐과 측정 체적의 거리 100mm지점과 200mm지점에서 측정한다(이하 100mm지점은 F100으로 표시하고, 200mm지점은 F200으로 표시한다).

페인트는 일반적으로 사용되는 투명 페인트: 경화제 : 신너를 중량비 10 : 1 : 1의 조성비로 섞어서 사용하고, 스프레이 건의 토출 밸브는 완전히 개방한다.

일반적으로 실험에 사용되는 유체의 도장 거리는 150~200mm이므로 200mm지점을 선택하

였고, 도장 전의 액적의 상태를 알아보기 위하여 100mm지점도 측정하였다.

측정 체적의 위치는 F100에서는 스프레이 건 노즐의 중심축에서 아래 방향으로 5mm씩 55mm까지 측정하고, F200에서는 10mm씩 110mm까지 측정한다.

압력은 100kPa에서 시작하여 400kPa까지 100kPa씩 증가시켜 가면서 측정하였다.

3.2.2 페인트 조성비에 따른 액적의 측정 방법

이 실험은 투명 페인트와 경화제, 그리고 신너의 중량비 조성에 따른 액적의 분무 특성을 알아보는 실험으로 스프레이 건의 노즐과 측정 체적의 거리는 200mm지점으로 고정하고, 실험 3-2-1의 결과에 따라 분사 압력은 300kPa로 놓는다. 그리고 스프레이 건의 토출 밸브는 완전히 개방한다.

측정 체적의 위치는 스프레이 건 노즐의 중심에서 아래 방향으로 10mm씩 70mm까지 측정 하였으며, 페인트 : 경화제 : 신너의 조성비는 10 : 0 : 1, 10 : 1 : 0, 10 : 1 : 1, 10 : 1 : 2, 10 : 2 : 1의 5가지 경우를 측정하였다. 경화제나 신너는 첨가제이므로 비율을 많이 잡지 않았다.

3.2.3 페인트 유량 변화에 따른 액적의 측정 방법

이 실험은 스프레이 건으로부터 분무되는 페인트의 유량 변화에 따른 액적의 분무 특성을 알아보는 실험이다. 스프레이 건의 노즐과 측정 체적의 거리는 200mm지점으로 고정하고, 실험 3-2-1의 결과에 따라 분사 압력은 300kPa로 놓는다. 그리고 사용된 페인트의 조성비는 실험 3-2-2의 결과에 따라 10 : 1 : 1을 사용한다.

측정 체적의 위치는 스프레이 건 노즐의 중심에서 아래 방향으로 10mm씩 70mm까지 측정하였으며, 유량은 1분 동안 스프레이 건을 통해 분무되는 페인트의 유량을 0.045 l/min, 0.110 l/min, 0.155 l/min, 0.171 l/min의 4가지로 나누어 측정하였다.

액적의 유량 측정 할 때에는 스프레이 건의 노즐 밸브 개폐에 의한 분무 액적의 단위 시간

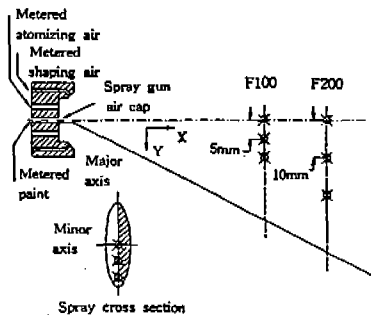


Fig.5 Schematic Diagram of Measurement Points

당 유량 측정은 본 실험에서 사용된 PDPA장치로는 불가능하다. 그 이유는 PDPA장치에서는 측정 체적 즉, Fringe 공간을 통과하는 액적들만을 측정하기 때문에 분무된 액적들의 전체 유량은 알 수가 없다. 그러므로 유량 측정은 일정량의 페인트를 비이커에 담아 두고 일정 시간 동안 스프레이 건을 통해 분무시켰을 때 비이커에서 빠져나간 양을 측정한다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 분사 압력 변화에 따른 액적의 특성

4.1.1 액적의 분포

각 압력에 따른 분포를 Fig.6에서 Fig.9까지 나타내었다. 각 그림은 직경에 따른 속도의 분포를 나타내었으며, 임의의 압력에 대한 임의의 위치별로 표시하였다.

Fig.6은 F100에서 X축 방향의 액적 분포를 나타낸 것이다. 100kPa의 상태에서 0mm지점에서는 속도가 10~12m/s의 범위에 있고 20mm 지점에서는 8~11m/s, 40mm지점에서는 4~6m/s의 범위에 있다. 이와 같이 속도는 중심에

서 멀어질수록 감소하고 있다. 직경은 측정 위치가 노즐 중심에서 멀어질수록 액적의 직경이 작은 부분(30 μ m)과 큰 부분(50 μ m)으로 이분화 되는 현상이 두드러지게 나타난다. 이것은 스프레이 건의 에어 캡 선단부에서 진공력 발생 상태가 좋지 않아 분사가 제대로 이루어지지 않기 때문이다. 낮은 압력 하에서 이분화 현상이 일어나면 분사 부족 현상으로 인하여 작업 대상물에 페인트가 도달하지 못하고 얼룩 현상이 발생할 수 있다.

압력이 200kPa과 300kPa에서는 낮은 압력에서 발생하던 이분화 현상이 사라졌다. 이것은 분사 선단부에서 진공력의 발생이 용이하고 패턴 형상을 만드는 공기의 압력이 알맞게 맞추어져서 분무 상태가 좋아진 것을 나타내는 것이다. 속도의 분포는 거리에 따라서 감소되고 있으나, 압력이 100kPa인 상태보다 속도 저하 폭은 낮게 나타난다(200kPa의 경우 0mm지점 11~14m/s, 20mm지점 9~13m/s, 40mm지점 8~11m/s, 300kPa의 경우 0mm지점 12~16m/s, 20mm지점 10~14m/s, 40mm지점 8~12m/s). 압력이 높은 상태인 400kPa에서는 속도가 일정하다가 중심에서 멀어지면 감소하는 것을 볼 수 있다(0mm지점 15~19m/s, 20mm지점 13~16m/s, 40mm지점 11~14m/s). 액적의 크기는 200kPa이나 300kPa상태일 때 보다는 직경이 작게 분포되고 있다. 그러나 여기에서도 패턴 모양을 만드는 공기의 증가로 인하여 이분화 현상이 다시 일어난다. 이와 같이 압력이 높은 상태의 이분화 현상은 과잉 분사로 인하여 필요 이상의 페인트를 사용하게 되어 손실이 크고 페인트가 작업 대상물에 충돌하여 더스트로 되는 양이 증가하므로 깨끗하고 매끄러운 도장면을 만들지 못한다.

Fig.7은 F200에서 X축 방향의 액적 분포를 나타낸 것이다. 100kPa에서는 F100에서 나타나는 이분화 현상이 계속 지속되고 있으며 속도는 F100보다 감소하는 것을 볼 수 있다(20mm 지점 6~8m/s, 60mm지점 4~6m/s, 100mm지점 2~4m/s).

200kPa과 300kPa에서는 F100인 경우와 마찬가지로

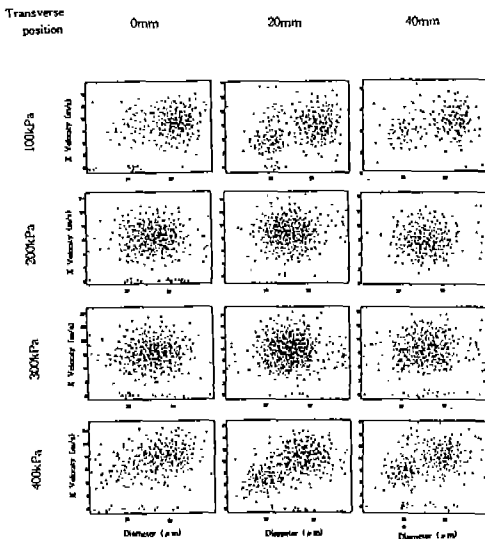


Fig.6 Distribution of Diameter and X Directional Velocity(F100)

가지로 이분화 현상이 나타나지 않으며 속도는 감소하고 있다. 이것은 분사 거리가 증가함에 따라서 액적의 상호 영향 및 공기의 저항에 의한 분사 속도 감소로 볼수 있다(200kPa경우 20mm지점 9~13m/s, 60mm지점 6~11m/s, 100mm지점 5~8m/s). 중심으로부터 Y방향으로 증가하면서 속도는 감소되어 나타난다.

400kPa에서는 이분화 현상이 다시 일어나는데, 이것은 F100에서 이분화된 액적들이 패턴 모양을 형성하는 공기의 영향을 계속 받으면서 200mm지점까지 이동하기 때문이다. 이 지점에서 속도도 F100보다는 전체적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며, Y방향에서는 중심에서 멀어 질 수록 속도가 감소됨을 볼 수가 있다(20mm지점 14~18m/s, 60mm지점 12~15m/s, 100mm지점 7~10m/s).

Fig.8은 F100에서 Y방향의 액적 분포를 나타낸 것이다. 각 압력대에 걸쳐 측정 위치가 중심에서 멀어짐에 따라 0m/s에서 3~4m/s까지 조금씩 증가한다. 여기서도 액적의 크기는 X축 방향 분포와 마찬가지로 100kPa과 400kPa에서 이분화 현상이 나타난다.

200kPa과 300kPa에서는 이분화 현상이 발생

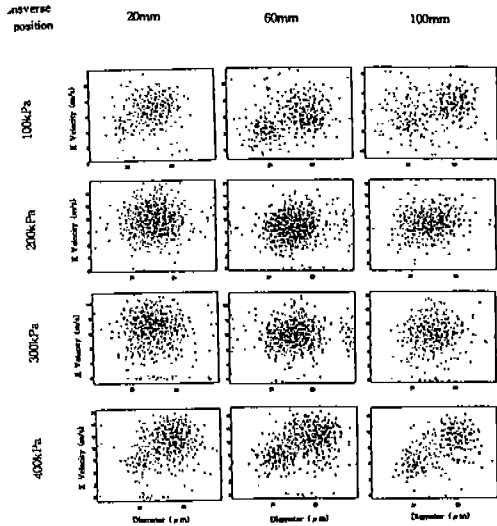


Fig.7 Distribution of Diameter and X Directional Velocity(F200)

하지않고, 액적의 크기는 40µm근처에서 고루 분포하고 있다.

Fig.9는 F200에서 Y축 방향의 액적 분포를 나타낸 것이다. 100kPa에서는 F100에서 나타나는 이분화 현상이 계속 지속되며, 속도는 F100보다는 감소되는 것을 볼 수 있다.

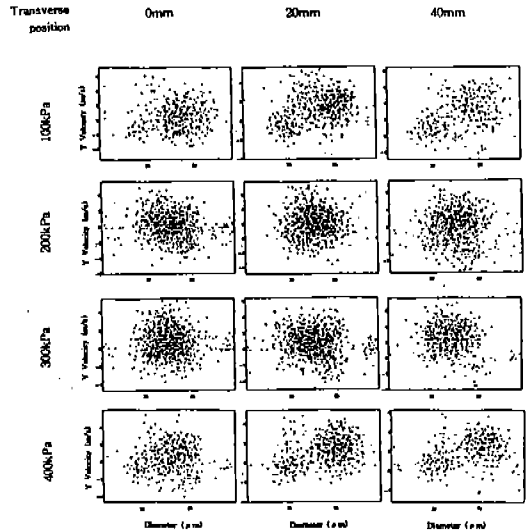


Fig.8 Distribution of Diameter and Y Directional Velocity(F100)

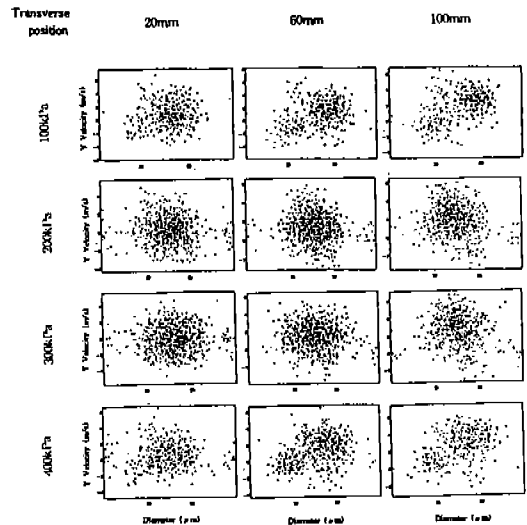


Fig.9 Distribution of Diameter and Y Directional Velocity(F200)

200kPa과 300kPa에서는 이분화 현상이 사라지고, 속도는 F100보다 감소하고 있다.

400kPa에서도 이분화 현상이 다시 일어나는 것을 볼 수 있으며, 이것은 F100에서 이분화된 액적들이 패턴 모양을 형성하는 공기의 영향을 계속 받으면서 200mm지점까지 이동하기 때문이다. 이 지점에서 속도는 F100보다 감소하고 있다.

4.1.2 액적의 속도

X방향의 액적 속도 분포를 보면 압력이 증가함에 따라서 평균 속도가 증가함을 보이고 있다. 이러한 X축 방향의 속도 분포를 Fig.10과 Fig.11에 표시하였다. Fig.10에서 F100의 경우 최고 속도가 100kPa에서는 약 11m/s이었지만 400kPa에서는 약 19m/s까지 증가함을 볼 수 있다. 그리고 중심에서 멀어질수록 속도는 감소하며 25mm까지는 거의 속도 분포가 균일하다가 30mm부터 55mm까지는 급격히 속도가 감소함을 볼 수 있다. 0mm~25mm지점까지는 분무화 공급 공기의 영향으로 거의 비슷한 속도 분포를 나타내고 있다. 그리고 5mm와 10mm지점에서는 각 압력대에서 가장 빠른 속도를 보여주고 있다.

Fig.11에서 F200의 경우 최고 속도가 100kPa에서는 약 7.5m/s이었지만 400kPa에서는 약

17m/s이었다. 여기에서도 중심에서 멀어질수록 속도는 감소하여 나타나지만 F100에서 나타나는 급격한 속도의 감소는 없으며 X축 방향의 속도는 완만한 감소를 보이고 있다. 그 이유는 분무 거리가 증가함에 따라 주위 액적의 속도 분포와 공기의 저항이 생기기 때문이며 주위에서 같이 이동하고 있는 액적의 속도에 의해서도 영향을 받는다. 0mm에서 20mm지점에서는 각 압력대에서 가장 빠른 속도를 보여주고 있다.

Y방향의 액적 속도 분포를 보면 포물선과 같은 분포를 보이고 있다. Y축 방향의 속도 성분을 Fig.12와 Fig.13에 나타내었다. 분사 방향 중심(0mm)에서부터 멀어질수록 속도가 증가하다가 어느 부분을 정점으로 속도가 다시 떨어짐을 보이고 있다. 0mm지점 부근은 주로 분무화 공기의 영향으로 낮은 속도를 보이고 있다. 즉 분무화 공기의 영향만을 받기 때문에 Y축 방향의 속도 성분이 작게 나타난다. 속도가 증가되는 부분은 분무화 공급 공기의 영향이 서서히 감소하며 패턴 모양을 형성하는 공기의 영향이 증가함을 나타내는 것이다. 속도가 가장 높은 부분은 패턴 모양을 형성하는 공기의 영향이 가장 강한 부분이므로 속도가 높은 부분을 정점으로 하여 속도의 감소를 보이는 부분은 패턴 모양을 형성하는 공기의 영향이 감

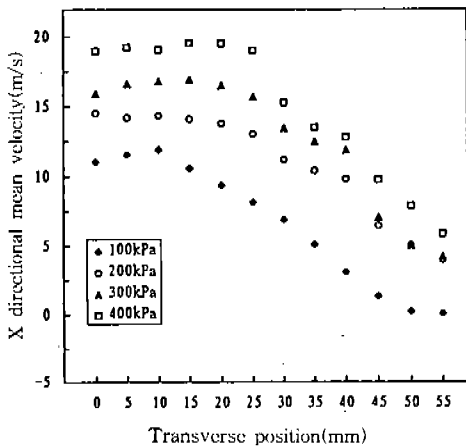


Fig.10 Transverse Position vs. X Directional Mean Velocity(F100)

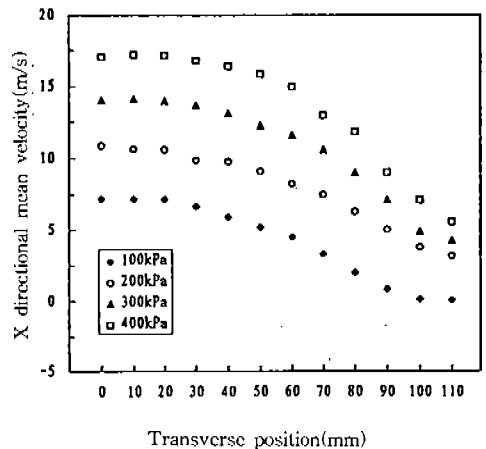


Fig.11 Transverse Position vs. X Directional Mean Velocity(F200)

소되며 공기 저항이 높다는 것을 보여준다.

Fig.12에서 F100의 경우 0mm~25mm에서는 반경 방향의 평균 속도가 포물선으로 증가하다가 25mm지점과 35mm지점에서 가장 빠른 속도 즉, 압력이 100~400kPa범위에서 약 6.1m/s~1.5m/s를 갖는다. 그러나 30mm지점에서 속도가 잠시 감소하는 경향을 보이는데, 이것은 양 측면에서 분출되는 패턴 형성 공기들간의 간섭에 의해 액적들의 상호 작용으로 속도가 감소되는 현상이라 할 수 있다. 이러한 경향은 McCarthy와 Senser¹⁾의 실험에서도 볼 수 있다.

Fig.13에서 F200의 속도 분포는 F100과 거의 같은 형태로 나타나고 있다. 최고 속도나 또는 갑자기 속도가 감소되는 부분(F200에서는 60mm인 곳)이 같은 경향을 보이고 있다. 최고 속도는 50mm지점과 70mm지점에서 나타나는 데 압력이 100~400kPa 범위에서 약 4.8m/s~0.4m/s를 갖는다.

4.1.3 액적의 크기

액적의 크기는 각 측정 지점에서 측정된 수치를 산술적으로 계산된 평균 직경(D10)과 Sauter 평균 직경(D32)으로 나누어서 측정했다.

Fig.14와 Fig.15는 측정 지점에 따른 평균 액적 직경을 표시한 것이다. 액적의 크기는 압력이 증가함에 따라서 작아짐을 보이고 있다. 이는 분무화 공급 공기의 압력이나 공기량의 증

가로 분무화가 원활히 이루어지기 때문이다. 분무화된 페인트는 다시 패턴 모양을 형성하는 공기에 의해서 미립화 된 액적으로 만들어지거나, 액적들이 다시 합체되어 새로운 액적을 형성한다. 낮은 모멘트를 가지고 운동하는 액적들이 서로 결합하여 높은 모멘트를 가진 액적으로 된다. 즉, 큰 액적이 되는 것이다. Mao, Wang과 Chiger의 실험에 의한 결과에서도 이러한 현상은 나타나고 있다.⁵⁾

그러나, 100kPa에서는 완전히 다른 경향으로 다른 압력대보다도 더 작은 액적의 크기를 가지고 있으며, 중심(0mm)에서 멀어질수록 평균 직경의 크기가 작아짐을 보이고 있다. 이것은 Fig.6~Fig.9에서 보는 바와 같이 액적의 직경이 이분화 되는 현상에 의한 것으로 분무화 공기량의 부족으로 분무화가 충분히 이루어지지 않기 때문이며 또한 중심에서 멀어질수록 패턴 모양을 형성하는 공기의 영향이 다른 압력대에 비해서 낮기 때문에 발생하는 것이다. 그러나 압력이 높아지는 부분(400kPa)에서는 Fig.6에서 Fig.9까지 보이는 것과 같이 액적의 크기 분포가 작은 부분과 큰 부분으로 이분화되었으나, 평균 직경은 일정하게 나타난다. 이것은 과잉 분사로 인한 액적의 크기가 큰 부분의 개수와 작은 부분의 개수의 평균 직경이 고르게 나타난 것으로 사료된다. 이러한 현상은 압력이

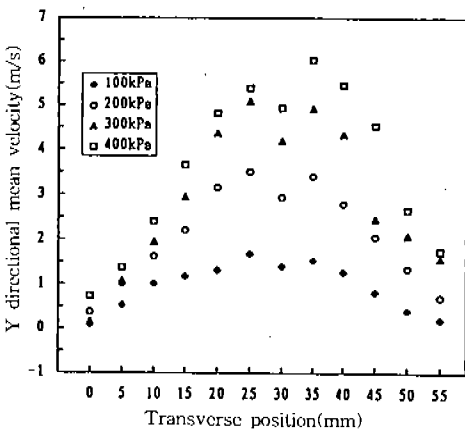


Fig.12 Transverse Position vs. Y Directional Mean Velocity(F100)

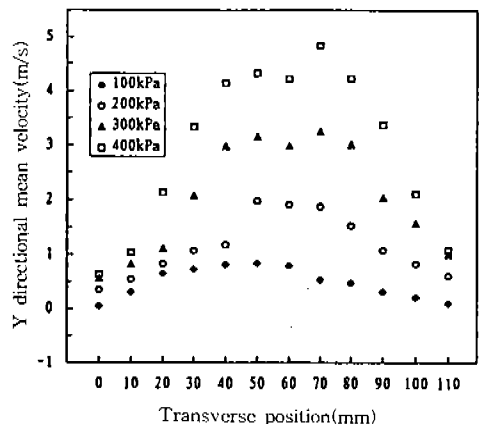


Fig.13 Transverse Position vs. Y Directional Mean Velocity(F200)

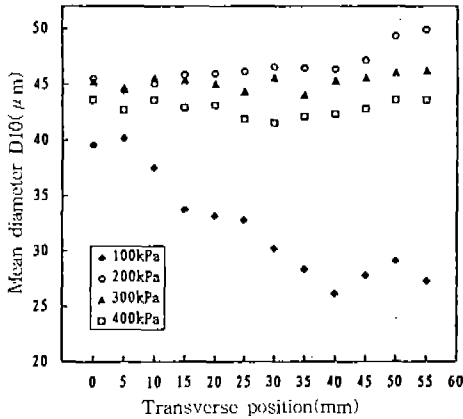


Fig.14 Transverse Position vs. Mean Diameter(D10) (F100)

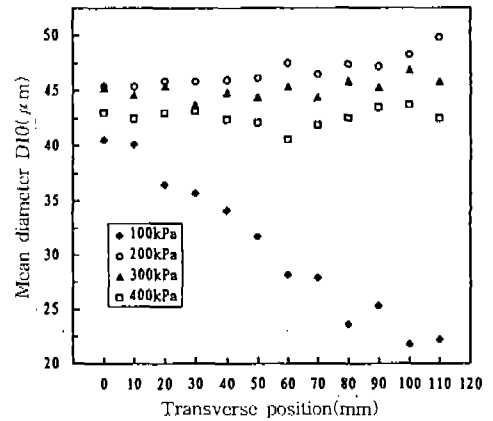


Fig.15 Transverse Position vs. Mean Diameter(D10) (F200)

낮은 부분과 압력이 높은 부분에서 같이 나타나고 있다.

일반적으로 액적의 크기는 어느 지점이든 같거나 비슷한 크기를 갖는 것이 중요하다. 같은 액적의 크기를 가져야만 파잉 분사 또는 분사 부족에 의해 생성되는 얼룩을 방지하여 균일한 도장이 가능하다.

그렇지 않으면, 압력이 낮은 상태에서는 분무화 공기의 영향에 의해 중심에서는 크기가 작은 액적이 존재하며 중심에서 멀어질수록 점점 크기가 큰 액적이 분포하게 된다. 그러나 압력이 증가함에 따라 이러한 현상은 사라지며 패턴 모양을 만들어 주는 공기에 의하여 중심에서 멀어지는 부분까지 거의 같은 크기의 액적을 만들어 주게 된다. 그렇지만 압력이 너무 높은 상태가 되면 패턴 모양을 만드는 공기에 의하여 액적의 크기가 큰 부분과 작은 부분이 같이 존재하게 된다. 이와 같이 압력이 낮거나 높은 상태가 되면 표면을 도장하는데 좋지 않다.

F100과 F200의 액적의 크기를 비교하여 보면 F200의 액적의 크기가 좀 더 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 분사되는 동안 즉, F100까지 도달한 액적이 F200으로 이동하는 동안 분무화 공기와 패턴 모양을 형성하는 공기가 서로 방향이 틀리기 때문에 경로를 달리하는 액적들이 충돌이나 간섭에 의하여 액적이 합체하

거나 분리 결합에 의해서 액적들이 커지는 것이다. 다시 말해서 분사하여 이동하는 동안 속도의 감소와 주위 액적들의 분포 형태 그리고 액적들의 합체 등에 의하여 액적의 크기가 증가됨을 보여준다. 액적의 크기 면에서는 압력이 너무 크면 액적의 크기가 다른 것이 혼합되고, 압력이 너무 낮으면 액적의 크기가 너무 작고, 압력이 200~300kPa 범위에서 $42\mu\text{m}$ ~ $47\mu\text{m}$ 크기의 액적이 끌고루 분포되어 있다.

Sauter 평균 직경을 사용하는 이유는 측정된 분포를 가장 현실적인 분포로 만들기 위해서다. 측정된 액적의 크기를 모두 합산하여 이것을 측정된 입자의 개수로 나누는 산술적인 평균 직경은 항상 분포가 높은 부분의 액적 직경을 나타내지는 않는다. 모든 분포의 수를 가중치 없이 똑같이 합산하고 다시 그 개수로 나누기 때문에 항상 분포가 높은 부분에 평균값이 위치하지는 않는다. 그러나 Sauter 평균 직경은 분포가 높고 측정된 부분의 개수가 많은 곳에 가중치를 두어서 평균값을 계산하기 때문에 측정되는 액적의 분포가 높은 곳에서 평균값이 결정되게 된다. 즉, 분포의 개수가 많은 부분은 큰 수로 3승이 되어 합산이 되므로 더욱 더 큰 수가되며, 분포 개수가 적은 부분은 낮은 수로 3승이 되어 합산 되기 때문에 높은 분포의 액적에 평균값이 정해지게 되는 것이다. 압력이

낮은 상태(100kPa)에서는 횡단면의 중심에서 멀어질수록 산술적인 평균 직경은 작아진다 (Fig.14와 Fig.15), 이것은 직경의 이분화로 평균이 낮게 나타나게 된 것이고 Sauter 평균 직경은 산술 평균 직경과 마찬가지로 중심에서 멀어질수록 작아지고 있으나 그폭은 적다

Fig.16과 Fig.17에서 보는 바와 같이 액적의 크기가 작은 액적이 중심 부분에 위치하고, 중심에서 멀어질수록 점차적으로 증가한다. 이것은 분무된 액적들이 이동하면서 액적의 상호 작용에 의하여 액적들의 합체가 일어나서 큰 액적들이 되어, 큰 모멘트를 갖기 때문이다. 그렇기 때문에 중심에는 작은 액적들이 중심에서 멀어질수록 큰 액적들이 존재하게 된다. 이러한 경향은 Mao, Wang, Chigger⁵⁾의 무점화 공급 공기 스프레이 내에서의 위치에 따른 Sauter 평균 직경 분포와 같은 경향이다.

이 실험으로부터 얻은 결과로 후의 두 실험에서는 분사 압력을 300kPa로 고정하여 실험을 하였다.

4.2 페인트 조성비에 따른 액적의 특성

4.2.1 액적의 분포

초기 실험에서 Y방향 속도의 경우 측정 체적의 위치가 70mm지점에서 떨어지고 있다. 이는 측정 위치가 너무 멀어져서 분사의 범위를

넘어가기 때문이다. 따라서 이 번 실험부터는 70mm지점까지만 측정하기로 했다.

분사된 액적들의 분포 형태가 각각의 조성비에 따라 어떻게 분포하고 있는지를 알아본다. F200인 경우와 분사 압력 300kPa인 경우를 기준으로 삼았으며 조성비는 페인트 : 경화제 : 신너의 중량비로 나타낸다.

Fig.18은 X축 방향 액적 분포를 나타내고, Fig.19는 Y축 방향의 액적 분포를 나타냈다. Fig.18을 보면 조성비가 10 : 0 : 1인 경우 액적의 측정이 잘 안되며, 측정 위치가 노즐 중심에서 멀어질수록 액적의 직경이 작은 부분(30 μ m 근처)과 큰 부분(50 μ m 근처)으로 분리되는 이분화 현상이 나타나는 것은 조성비가 나쁠 경우 분무 조건이 나빠져서 측정 체적이 노즐 중심에서 멀어지면서 액적들이 서로 충돌하기 때문이다.

조성비가 10 : 1 : 0인 경우에도 액적의 측정이 잘 안되며, 처음부터 액적의 직경이 이분화되는 현상을 보이고 있다.

일반적으로 쓰이는 조성비 10 : 1 : 1의 경우는 입자의 측정이 잘 되었으며 그 크기는 30~50 μ m의 직경 범위에 있고 측정 위치가 0mm 지점에서는 속도가 약 9~13m/s 범위에 있고, 30mm지점에서는 약 8~12m/s, 60mm지점에서는 약 6~10m/s 범위에 있으므로 측정 위치가

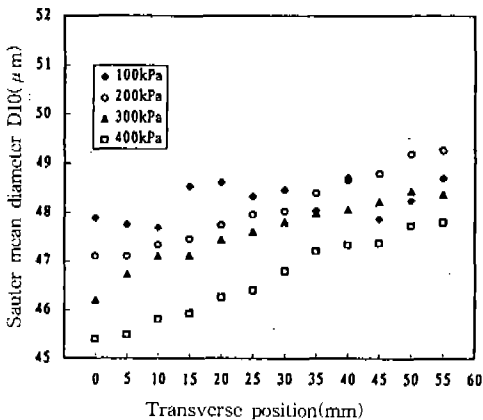


Fig.16 Transverse Position vs. Sauter Mean Diameter(D32) (F100)

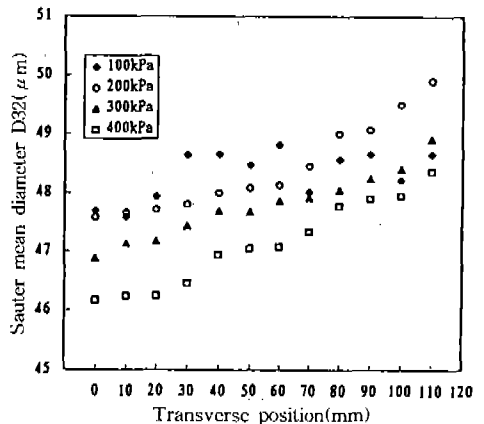


Fig.17 Transverse Position vs. Sauter Mean Diameter(D32) (F200)

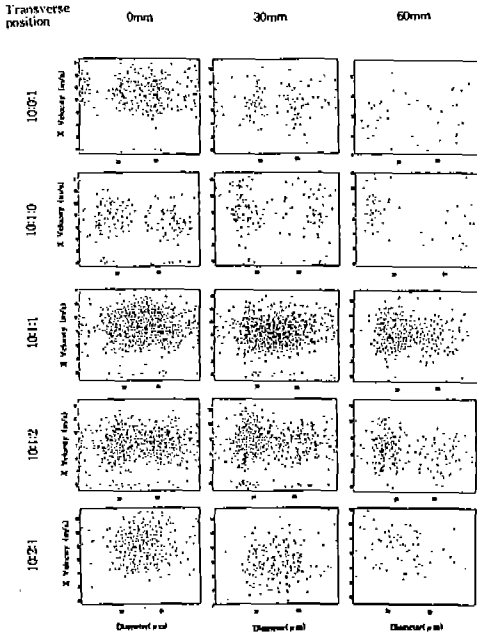


Fig.18 Distribution of Diameter and X Directional Velocity(F200)

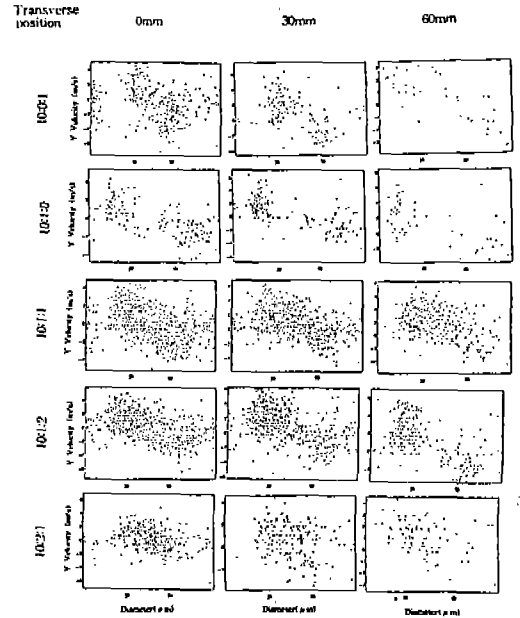


Fig.19 Distribution of Diameter and Y Directional Velocity(F200)

떨어질 수록 속도는 조금씩 감소함을 알 수 있다. 이는 속도의 분포, 직경 범위, 액적의 분포로 보아 적절한 조성이다.

·조성비가 10 : 1 : 2인 경우는 액적의 측정이 잘 되고 있으나 중심에서 멀어지면 액적의 이분화 현상이 나타난다.

10 : 2 : 1의 경우는 액적이 이분화되는 현상은 별로 없으나 측정된 액적의 수가 적고 넓은 범위의 직경 분포를 갖는다.

Fig.19를 보면 조성비가 10 : 0 : 1, 10 : 1 : 0인 경우 X축 방향과 마찬가지로 액적의 측정이 곤란하고, 액적의 이분화 현상도 나타나고 있다. 측정되는 액적의 수가 적다는 것은 그만큼 분무가 잘 이루어지지 않는다는 것을 나타내며, 액적이 이분화 되게 되면 작업 대상물에 페인트를 분무시켰을 때 페인트가 골고루 분사되지 못할 뿐만 아니라 얼룩 현상도 발생하게 된다. 속도는 다른 조성비와 비슷하게 -2~2m/s의 범위에 분포하고 있다(여기서 속도가 '-'라는 것은 Y축 방향을 아래 방향으로 잡아

주었기 때문에 그 반대 방향인 위 방향으로 움직인다는 것을 뜻한다).

대체로 조성비가 10 : 1 : 1의 경우가 액적 측정이 잘 되며, 10 : 1 : 2의 경우는 액적의 측정은 잘 되지만 중심에서 멀어질수록 이분화되는 경향이 강하다.

조성비가 10 : 2 : 1인 경우 측정 액적의 수는 다소 적은 편이나 이분화 현상을 보이고 있는데, 이는 경화제가 많이 함유되어 페인트와의 응집력이 커지기 때문이다.

결론적으로 조성비가 10 : 1 : 1인 경우 액적의 측정이 비교적 잘 되며, 속도 분포와 액적의 크기도 도장 조건에 적합하다고 사료된다.

4.2.2 액적의 속도

그림에서 X축 좌표를 스프레이 건 중심과 측정 체적의 수직 거리로 잡고, Y축 좌표를 속도로 잡았다.

1) X방향 속도

분사되는 방향인 X축에서의 초점 거리(F200)에 따른 조성비의 평균 속도 변화를 각각 Fig.

20에 표시하였다.

대체로 스프레이 건의 중심에서 멀어질수록 속도가 감소하고 있다. 조성비 10 : 0 : 1과 10 : 1 : 0의 조성에서는 속도가 중간에 갑자기 떨어지는 등 불규칙한 분포를 나타내고 있다. 다른 조성비에서는 측정점이 증가함에 따라 속도도 거의 일률적으로 감소하고 있으며, 특히 조성비가 10 : 1 : 1인 경우 거의 선형적으로 감소하고 있다.

경화제나 신너중 어느 하나가 없는 일부 조성에서 속도 분포가 다소 불규칙하게 나타나는 것은 분무화가 제대로 이루어지지 않기 때문이다.

2) Y방향 속도

분사되는 방향(X축 방향)에 수직인 방향인 Y축에서의 속도 변화를 Fig.21에 표시하였다.

대체로 스프레이 건의 노즐의 중심에서 측정 위치가 멀어질수록 속도가 증가하고 있으나, 그 간격이 X축 방향 속도처럼 크게 증가하지는 않고 0~3m/s의 범위에서 작게 증가하고 있다. 그리고 속도 분포도 조성비가 10 : 0 : 1과 10 : 1 : 0인 경우에는 속도가 갑자기 떨어지거나 불규칙적으로 증가하고 있다. 조성비가 10 : 1 : 1인 경우 속도 증가가 측정점의 증가에 따라 거의 직선적으로 증가되어 X방향과 Y방향의 속도 변화를 종합할 때 조성비가 10 : 1 : 1인 경우가 가장 안정적이라는 것을 알 수 있다.

4.2.3 액적의 크기

액적의 크기는 각 측정 지점에서 측정된 수치를 산술적으로 계산한 평균 직경(D10)과 Sauter 평균 직경(D32)으로 나누어서 표현한다. 그림의 X축 좌표는 스프레이 건 중심과 측정 체적의 수직 거리로 잡고 Y축 좌표는 액적 크기를 나타낸다.

Fig.22는 산술 평균 직경을 나타낸 것으로 액적의 크기가 41~45 μ m의 범위에 분포해 있다. 조성비가 10 : 0 : 1과 10 : 1 : 0의 경우는 액적의 크기가 일정하지 않고 불규칙적으로 변하고 있다. 이에 비해 다른 조성비들은 측정 체적의 위치가 노즐 중심에서 멀어질수록 액적의 크기가 약간 증가하고 있다. 조성비가 10 : 0 : 1과 10 : 1 : 0의 경우 액적의 크기가 이처럼 불규칙한 것은 Fig.18, 19에서 보이는 액적의 이분화 현상에 의한 것이다.

Fig.23은 Sauter 평균 직경은 액적의 크기가 44~47 μ m의 범위에 분포해 있고 산술 평균 직경에 비해 평균적으로 2~3 μ m정도가 더 크다. Sauter 평균 직경도 10 : 0 : 1과 10 : 1 : 0의 경우 액적의 크기가 일정하지 않고 불규칙적으로 분포하고 있다. 일반적으로 액적의 크기는 어느 지점이나 같거나 비슷한 크기를 갖는 것이 중요하다. 같은 액적의 크기를 가져야만 작업 대상물에 균일한 도장이 가능하다. 따라서, 조성비가 10 : 1 : 1의 경우가 위의 조건을 가장 잘 만족한다.

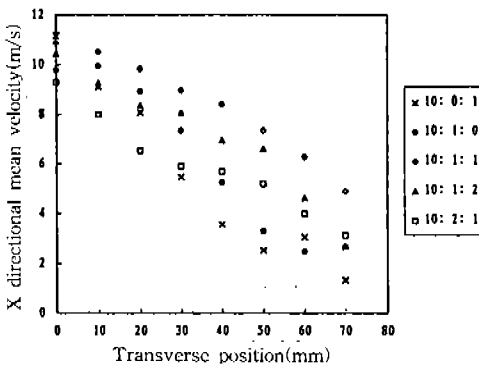


Fig.20 Transverse Position vs. X Directional Mean Velocity(F200)

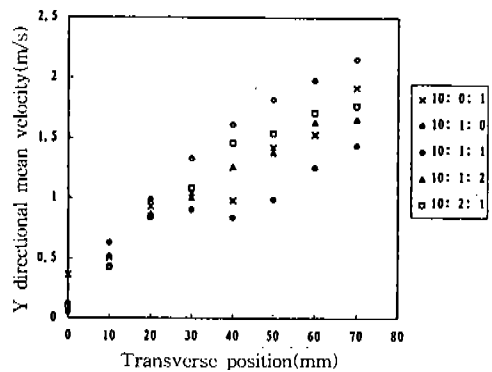


Fig.21 Transverse Position vs. Y Directional Mean Velocity(F200)

경화제나 신너의 조성비중 어느 한 쪽이 거의 없거나 부족하게 되면 분무가 제대로 이루어지지 않아 측정 체적에 도달하는 동안 액적 크기의 변화 폭이 커지고 속도도 일정하지 않게 되어 액적의 이분화 현상이 일어난다. 이와 같이 조성비중 어느 한 쪽이 거의 없거나 부족한 경우나 과도한 경우에는 도장의 대상 조건으로 적합하지 않았다.

이 실험으로부터 얻은 결과로 페인트의 유량 변화에 따른 액적의 특성에 대한 실험은 페인트의 조성비를 10 : 1 : 1로 고정하여 실험하였다.

4.3 페인트의 유량 변화에 따른 액적의 특성

4.3.1 액적의 분포

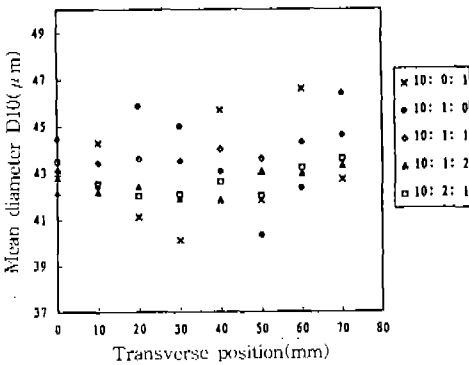


Fig.22 Transverse Position vs. Mean Diameter (D10) (F200)

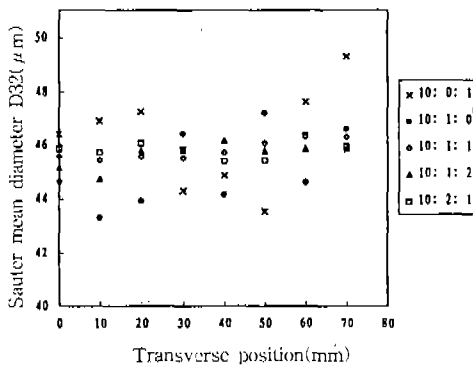


Fig.23 Transverse Position vs. Sauter Diameter (D32) (F200)

유량에 따른 각 액적들의 분포는 그림의 X좌표를 액적의 크기로 잡고, Y좌표를 속도로 하여 Fig.24는 액적이 정면으로 나가는 X방향 속도와 액적 분포를 나타내고, Fig.25는 액적의 Y방향 속도와 액적 분포를 나타낸다.

Fig.24는 F200인 경우 각각의 유량에 따른 X방향 속도와 액적 분포를 나타낸 것이다. 네 가지 경우의 유량들의 공통된 특징은 측정 지점의 위치가 스프레이 건의 노즐 중심에서 멀어질수록 액적의 측정 개수가 적어진다는 점이다.

유량이 0.045 l/min의 경우 나가는 유량이 적기 때문에 측정된 액적의 개수가 현저하게 적고, 액적이 이분화 되는 현상을 보이고 있다. 이는 스프레이 건에서 나가는 도료의 토출량이 적기 때문에 압축 공기의 양이 도료와 혼합되는 비율이 상대적으로 커지게 되고 이로 인해 에어캡 선단에서 분무가 제대로 이루어지지 않기 때문이다. 또한 유량이 0.110 l/min의 경우도 0.045 l/min의 경우보다는 액적의 측정 개수가 많지만 다른 유량들(0.155 l/min인 경우와 0.171 l/min인 경우)에 비해 적다. 유량이 0.155 l/min인 경우는 액적의 크기가 30 μm와 50 μm 사이에 집중되지 않고 다소 넓게 분포하

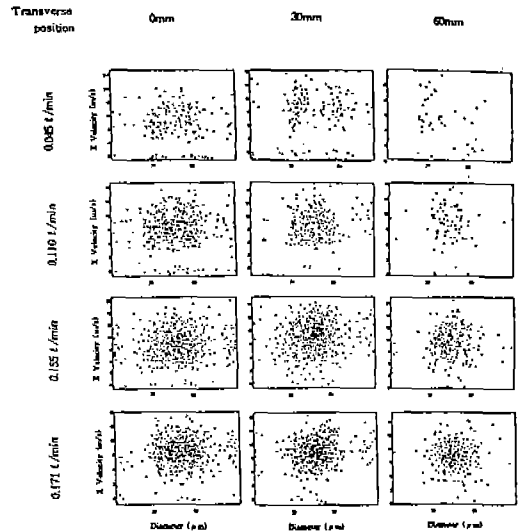


Fig.24 Distribution of Diameter and X Directional Velocity(F200)

고 있다. 이는 액적의 크기가 유량이 0.171 l/min인 경우에 비해 덜 일정하다는 것을 의미한다. 0.171 l/min인 경우는 측정된 액적의 수도 많고 액적의 크기도 40 μm부근에서 집중되어 있다. 액적의 속도 분포는 10~14 m/s에서 8~12 m/s로 조금씩 떨어지고 있고, 액적의 크기 분포는 30~50 μm부근에 밀집되어 있다.

Fig.25는 F200인 경우 Y방향 속도의 액적 분포이다. X방향 속도의 액적 분포와 마찬가지로 측정 위치가 스프레이 건의 노즐 중심에서 멀어질수록 액적의 측정 개수가 적어지고, 유량이 0.045 l/min의 경우에는 이분화 현상이 현저하게 나타나고 있다. 이분화는 액적이 큰 부분(50 μm)과 작은 부분(30 μm)으로 나뉘어지고, 액적이 큰 부분은 속도 분포가 (-)부근에 있고, 액적이 작은 부분은 속도 분포가 (+)부근에 있다. 유량이 0.155 l/min인 경우는 유량이 0.171 l/min인 경우보다 액적의 크기가 가운데(40 μm부근)에 덜 집중되어 있다. 유량이 0.171 l/min인 경우의 액적의 속도 분포는 0 m/s정도에서 2 m/s정도로 조금씩 증가하고 액적의 크기 분포는 40 μm부근에 집중하여 분포하고 있다.

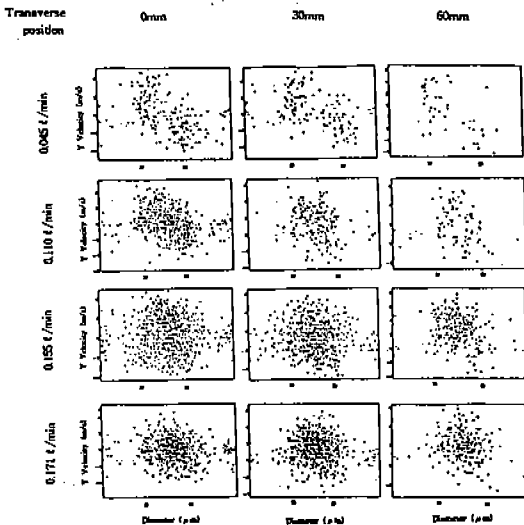


Fig.25 Distribution of Diameter and Y Directional Velocity(F200)

이처럼 X방향과 Y방향의 액적 분포가 유량이 적을 경우 이분화 현상이 생기는데, 이것은 도료가 분무되었을 때 골고루 분무되지 않아 한쪽으로 몰리게 되어 작업 대상물에 도장이 제대로 이루어지지 않게 된다. 이번 실험에 사용한 유량 변화 중에서 0.171 l/min의 경우가 가장 적당한 분포를 보이고 있다.

4.3.2 액적의 속도

유량에 따른 액적의 속도는 그림에서 X축을 스프레이 건의 노즐 중심과 측정 지점의 수직 거리로 잡고, Y축을 속도로 잡아서 나타냈다. Fig.26은 액적의 X방향 속도를 나타내고 있고, Fig.27은 Y방향 속도를 나타낸다.

1) X방향 속도

Fig.26에서 각 유량에 따른 평균 속도 분포는 대체로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 측정 지점의 위치가 스프레이 건 노즐의 중심에서 멀어질수록 분사되는 압력이 약해지기 때문이다. 또한 유량이 증가함에 따라 평균 속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 처음 측정 위치가 0mm인 경우는 속도가 11~12 m/s의 범위에 있고, 35mm인 경우는 속도가 5~8 m/s의 범위에 있다. 유량이 0.045 l/min인 경우의 X방향 속도 분포는 다소 불규칙하게 나타났다.

2) Y방향 속도

Fig.27에서 각 유량들의 속도는 대부분 증가하고 있지만 유량이 0.045 l/min인 경우는 증가하다가 감소하고 있다. 이는 유량이 적어서 생기는 이분화 현상 때문이다(이분화 현상이 생기면 액적이 큰 부분과 작은 부분으로 나뉘고 이것들은 각각 반대 방향으로 분출되므로 평균 속도는 0 m/s에 근접하게 된다). 따라서, 측정 지점이 멀어질 때 이분화 현상이 생기므로 25mm지점부터 속도가 감소하고 있다. 나머지 유량들은 속도가 0 m/s에서 2~2.5 m/s까지 순차적으로 증가하고 있다.

Fig.26과 Fig.27을 종합해 보면 유량이 많은 경우 X방향 및 Y방향의 속도가 클 뿐만 아니라 측정 지점의 증가에 따라 규칙적으로 변한다.

4.3.3 액적의 크기

유량에 따른 액적의 크기는 그림에서 X축을

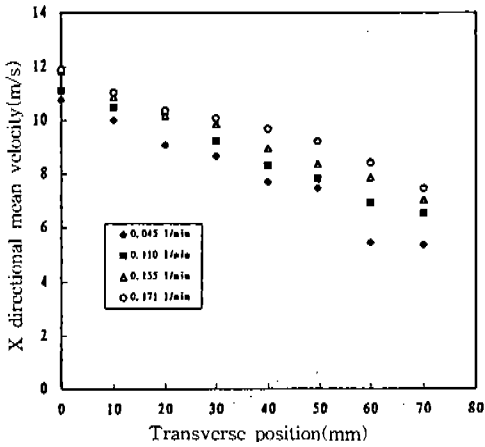


Fig.26 Transverse Position vs. X Directional Mean Velocity(F200)

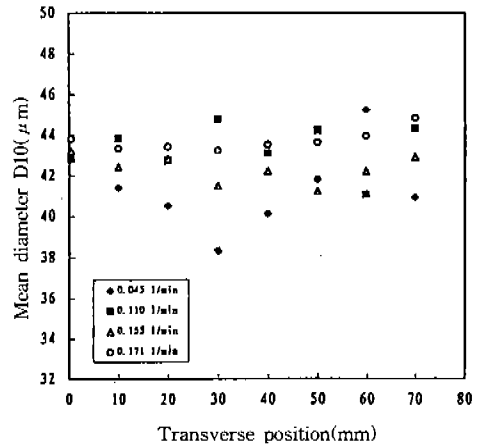


Fig.28 Transverse Position vs. X Mean Diameter(D10) (F200)

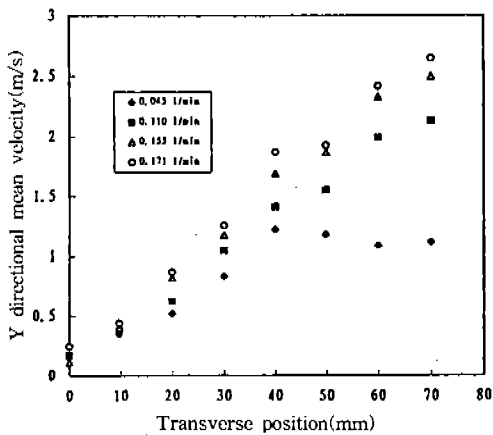


Fig.27 Transverse Position vs. Y Directional Mean Velocity(F200)

스프레이 건의 노즐 중심과 측정 지점의 수직 거리로, Y축을 액적의 크기로 잡아서 나타냈다. 액적의 크기는 각 측정 지점에서 측정된 수치를 산술적으로 계산한 산술 평균 직경(D10)과 Sauter 평균 직경(D32)으로 나누어서 각각 Fig.28과 Fig.29에 나타냈다.

Fig.28에서 산술 평균 직경을 이용한 액적의 직경은 대체로 40~44 μm의 범위에 있다. 유량이 0.045 l/min인 경우 측정 지점이 30mm 지점까지 떨어지다가 다시 증가하는 등 38~42 μm의 범위로 액적의 크기가 일정하지 않고 불규

칙하게 분포하고 있다. 이는 유량이 적은 경우 이분화 현상으로 인하여 액적이 큰 부분과 작은 부분으로 나뉘어져서 일정치 않은 크기를 보이고 있으며 유량이 0.110 l/min인 경우도 이분화 현상으로 인해 크기가 일정하지 않다. 유량이 0.155 l/min의 경우는 액적의 크기가 유량이 0.171 l/min인 경우보다 다소 불규칙적이다. 이는 Fig.24, 25를 보면 알 수 있다. 분포도에서 보면 유량이 0.155 l/min인 경우가 유량이 0.171 l/min인 경우보다 액적이 가운데에 집중하지 않고 넓게 퍼져 있기 때문이며 이것은 유량이 0.171 l/min인 경우보다 액적의 크기가 덜 일정하다는 것을 의미한다.

Fig.29에서 Sauter 평균 직경을 이용한 액적의 직경은 대체로 44~47 μm의 범위에 있다. 유량이 0.045 l/min인 경우와 유량이 0.110 l/min인 경우는 액적의 크기가 불규칙하게 나타나고, 유량이 0.155 l/min인 경우에서도 액적의 크기가 다소 불규칙적이다. 유량이 0.171 l/min인 경우는 액적의 크기가 일정하게 나타나고 있다.

일반적으로 유량이 적은 경우에는 액적의 크기가 일정하지 않고 불규칙적으로 나타나고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 이분화 현상 때문에 액적이 고르게 퍼지지 않고 큰 부분과 작은 부분으로 분리되어 분무되기 때문이다.

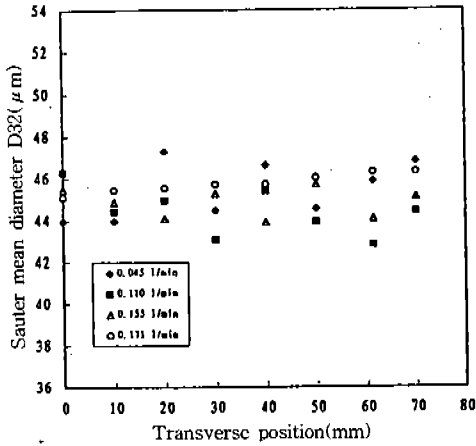


Fig.29 Transverse Position vs. Sauter Diameter(D32) (F200)

대체로 Sauter 평균 직경은 산술 평균 직경에 비해 2~3 μm 정도가 더 크게 나타나고 있다. 이는 Sauter 직경이 분포가 높은 부분 즉, 측정된 부분의 개수가 많은 곳에 가중치를 줌으로써 그 부분의 액적 직경이 결정되기 때문이다.

따라서 액적의 크기와 그 분포에 의하면 유량이 0.171 l/min인 경우가 이번 실험에 사용된 스프레이 건에 적합한 유량이다.

5. 결 론

투명 페인트를 스프레이 건에 넣어서 분사하는 분무 시스템을 사용하여 분무하는 동안, PDPA장치의 측정 위치를 통과하는 분무 액적의 속도와 크기를 동시에 측정하였다. 분사 압력, 조성비, 유량의 변화에 따른 분무의 미립화 정도와 액적의 운동 방향 및 특성에 대한 실험 결과를 다음과 같이 정리한다.

- 1) 분사 압력을 100kPa, 200kPa, 300kPa, 400kPa의 4가지 경우로 변화시켜 실험한 결과 100kPa과 400kPa의 경우에는 분사 상태가 매우 나빠서 액적이 큰 부분과 작은 부분으로 분리되는 이분화 현상이 생겼고, 200kPa과 300kPa의 경우는 액적의 크기가 일정하고 분포와 속도도 안정

적으로 나타났다.

- 2) 페인트 : 경화제 : 신너의 중량비의 조성을 10 : 0 : 1, 10 : 1 : 0, 10 : 1 : 1, 10 : 1 : 2, 10 : 2 : 1의 5가지 경우로 변화시켜 실험한 결과, 10 : 1 : 1의 경우가 가장 좋게 나타났다. 경화제나 신너중 어느 하나가 없는 조성인 10 : 0 : 1, 10 : 1 : 0과 두 성분이 모두 포함된 10 : 1 : 2의 조성인 경우에는 분사가 잘 이루어지지 않아서 액적의 측정이 적었고 이분화 현상도 나타났다. 10 : 2 : 1의 경우는 이분화 현상이 나타나지는 않았으나 10 : 1 : 1의 경우보다 액적의 분포가 나쁘게 나타났다.

- 3) 유량(분사량)을 0.045 l/min, 0.110 l/min, 0.155 l/min, 0.171 l/min의 4가지 경우로 변화시켜 실험하였고, 그 결과 0.171 l/min의 경우가 이 번 실험에 사용된 스프레이 건에 가장 적합한 유량이었다. 0.045 l/min와 0.110 l/min의 경우 나가는 유량이 적어서 측정되는 액적의 수도 적고 이분화 현상도 나타났다. 0.155 l/min의 경우는 비교적 잘 분사되기는 하였지만 스프레이 건의 토출 밸브를 완전히 개방한 0.171 l/min의 경우보다 액적의 분포가 나빴다.

따라서, 자동차의 보수 도장을 할 때 분사 압력은 200~300kPa 정도로 하여 분사하고, 페인트의 중량 조성비는 페인트 : 경화제 : 신너의 비율이 10 : 1 : 1로 하여 스프레이 건의 토출 밸브를 완전히 개방한 상태에서 분사하는 것이 가장 적절함을 실험 결과 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 1996년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었습.

참 고 문 헌

1. Gene F., "Industrial Paint Finishing Techniques and Processes", ELLIS HOR

- WOOD LIMITED, pp. 80~109, 1991.
2. Robert Scharff, Richard J. Paquette, "Complete Automotive Painting", Delmar Publishers Inc., pp. 47~81, 1990.
 3. Michael houser, "PDPA manual & report", Aerometrics-우주 하이테크, pp. 2-1~6-5, 1995.
 4. Mccarthy, J. E. Jr. and Senser, D. W., "The Influence of Air Supply Pressure on Paint Transfer", ILASS-AMERICAS 94, The Boeing Company, pp. 30~39, 1994.
 5. Norman Chigger, "Combustion Measurements", Hemisphere Publishing, pp. 41~46, 1991.