

〈論 文〉

와류 분무 노즐에 의해 형성되는 액적들의 균일도에 액체의 점도가 미치는 영향

이 상 용* · 김 인 구* · 조 한 권**

(1989년 2월 25일 접수)

Effect of Liquid Viscosity on the Degree of Uniformity of Drops from Swirl Spray Nozzles

Sang Yong Lee, In Goo Kim and Han Gweon Cho

Key Words : Drop Size Distribution(액적크기분포), Viscosity(점도), Injection Pressure(분사 압력), Standard Deviation(표준편차), Sauter Mean Diameter(Sauter 평균직경)

Abstract

Effect of liquid viscosity was studied experimentally on the drop size distributions of the liquid sprays from swirl atomizers. Glycerine-Water mixtures were used as test fluids for the experiments. Drop sizes of the liquid sprays were measured with the light scattering method. The concept of the standard deviation was introduced to represent the degree of uniformity of the drop size distributions. Experimental results show that the spray drops become coarser and less uniform with the liquid of higher viscosity. The effect of viscosity on the Sauter mean diameter and the standard deviation appeared to be more significant with the lower injection pressure. It was also confirmed that the Sauter mean diameter increases with the increase of the liquid viscosity and with the decrease of the injection pressure.

기 호 설 명

<p>a : 지수</p> <p>$f(x)$: x보다 큰 액적들의 누적체적 분율(fraction)</p> <p>L : 투사광의 측정길이</p> <p>n : 분무액적의 수밀도</p> <p>P : 분사압력</p> <p>q : 분산계수</p> <p>R : 분무단면의 반경</p> <p>R_0 : 레이저 광의 반경</p> <p>SMD : Sauter 평균직경</p> <p>$v(x)$: $1-f(x)$</p>	<p>v : 분무액적의 체적농도(volume concentration)</p> <p>V : 측정부피 안에서의 분무액적의 부피</p> <p>x : 액적직경</p> <p>X : Rosin-Rammler 함수의 분포변수</p> <p style="text-align: center;">그리스 문자</p> <p>δ : Rosin-Rammler 함수의 분포변수</p> <p>Γ : Gamma 함수</p> <p>ν : 분사 액체의 동 점성계수</p> <p>σ : 표준편차(standard deviation)</p>
---	---

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 현대자동차

하첨자

p : 측정위치

t : 분무단면 전체에 해당하는 값
 a : 가상치

1. 서 론

액체분무는 디젤엔진, 가스 터빈, 제트엔진과 산업용 로(furnace) 등의 연소 시스템에 많이 사용되고 있다. 액체분무에서는 액적의 크기를 예측하는 것이 매우 중요한 과제이며, 액적의 크기에 영향을 주는 인자들로서는 노즐의 형태, 분사액체의 물성치(점도, 표면장력, 밀도), 주위기체의 조건(온도, 압력, 응축과 증발현상), 분사압력 등이 있다. 분무연소 시스템의 경우, 분사액체로 사용되는 화석연료(fossil fuel)의 점도는 다른 조건에 비해 그 변화가 크기 때문에, 분무액적의 크기에 점도가 미치는 영향은 특히 중요한 연구과제가 되어 왔다(1~8). 일반적으로 많이 사용되고 있는 와류형 분무노즐의 경우 액체의 점도와 SMD(Sauter Mean Diameter)의 관계는 다음과 같은 형태로 나타나고 있으며

$$SMD \propto \nu^a \quad (1)$$

지수 a 는 노즐의 형태와 크기의 차이 그리고 실험 범위 및 측정위치의 차이 등으로 인해 다소 다르지만, 대체로 0.15~0.25의 범위로써 구해지고 있다(3~5,7).

여기서 SMD는

$$SMD = \frac{\int_0^\infty x^3 \frac{dn}{dx} dx}{\int_0^\infty x^2 \frac{dn}{dx} dx} = \frac{6 \times (\text{샘플 액적군의 체적의 합})}{(\text{샘플 액적군의 표면적의 합})} \quad (2)$$

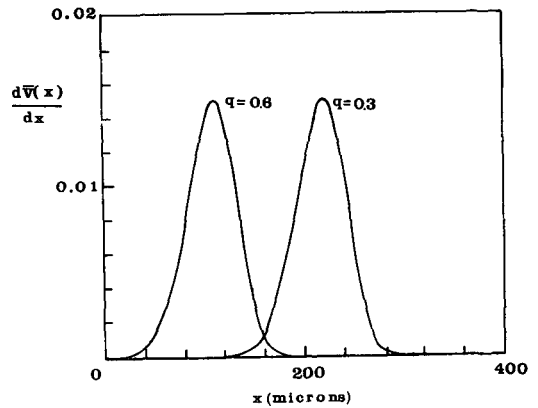
로 정의되며 액체분무의 미립화 정도를 나타내는 평균 액적크기이다.

그러나 실제 분무액적의 크기는 분포를 가지므로 같은 SMD를 가지더라도 그 분포의 정도는 크게 다를 수 있어 결과적으로는 분무액적의 크기를 평균값만으로 표현하는 것은 불충분할 뿐 아니라 그 적용에도 한계를 가지게 된다. 예컨대 분무연소 시스템에서 점화방식에 따라 같은 SMD를 가지더라도 압축점화를 하는 디젤엔진에서는 분무액적의 크기분포가 균일하지 않은 분무가 좋으며, 스파크 점화를 하는 가솔린 엔진이나 산업용 로에서는 균일한 분무가 증발이 잘 되어 연소효율에 좋다고 알려져 있다(1).

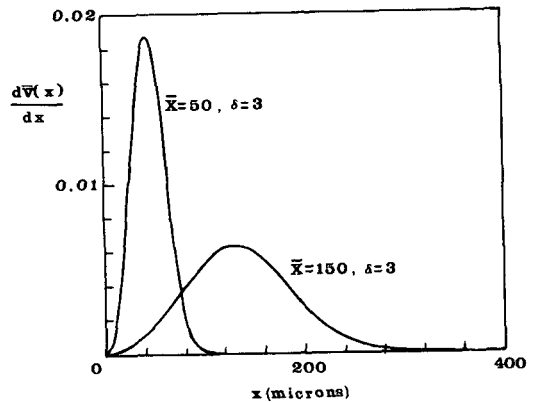
따라서 분무액적의 평균크기와 함께 그 분포의 정도인 균일도를 함께 나타내려는 시도가 Fraser와 Eisenklam(2)과 Zhao 등(8)에 의해 보고되고 있다. 그러나 Fraser와 Eisenklam은 분사액체의 점도가 낮고 분사압력이 높을수록 균일한 분무가 된다는 결론을 내린 반면 Zhao 등은 분사액체의 점도가 크고 분사압력이 낮을수록 균일한 분무가 된다는 결과를 얻고 있다. 이렇게 상반된 연구결과를 무엇보다도 액체분무의 균일도를 표현하는 방법에 그 원인이 있다. 우선 Fraser와 Eisenklam은 분무액적의 균일도를 나타내기 위해

$$q = \frac{x_{95\%} - x_5\%}{SMD} \quad (3)$$

로 정의한 분산계수(dispersion coefficient)를 사용하였다. 여기서 $x_5\%$ 와 $x_{95\%}$ 는 각각 채집액적 전체체적의 5% 및 95%가 이 크기보다 작은 크기를 가질 때의 크기들을 의미한다. 그러나 Fig. 1(a)에



(a) Change of Dispersion Coefficient



(b) Effect of \bar{x} on the Uniformity

Fig. 1 Statistical size distributions of spray drops

서 볼 수 있듯이 분포의 정도는 같으면서 SMD가 다를 때 식(3)으로 정의되는 분산계수는 다른 값을 가진다. 따라서 식(3)으로 표현되는 분산계수는 분무액적의 균일도를 적절히 표현한다고는 볼 수 없다. Zhao 등은 분무액적의 균일도를 조사하기 위해 다음과 같은 Rosin-Rammler 분포식을 이용하였다.

$$f(x) = 1 - \bar{v}(x) = e^{-(x/\bar{X})^\delta} \quad (4)$$

여기서 $f(x)$ 는 x 보다 큰 액적이 가지는 누적체적의 분절(fraction)이며 \bar{X} , δ 는 실험결과를 가장 잘 표현해 주는 변수들이다. Zhao 등은 식(4)에서 δ 를 분무액적의 균일도를 표현하는 단일변수로 취급하여 δ 가 커지면 바로 분무액적의 균일도가 좋은 것으로 간주하였다. 그러나 분포변수 δ 가 분무액적의 균일도에 크게 영향을 주는 변수이기는 하나, Fig. 1(b)로부터 \bar{X} 도 분무액적의 균일도에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 같은 맥락에서 평균 액적크기도 분포변수 \bar{X} 뿐만 아니고 δ 의 영향도 함께 받는다는 것을 다음의 SMD 관련식에서 확인할 수 있다⁽⁸⁾.

$$SMD = \bar{X} \left\{ \frac{\delta - 1}{\delta \Gamma(2 - 1/\delta)} \right\} \quad (5)$$

여기서 Γ 는 Gamma함수를 의미한다. 결국 Fig. 1(b)는 Rosin-Rammler 분포함수로 표현되는 분무액적의 균일도를 δ 만으로 표현하는 것은 충분하지 않으며 \bar{X} 의 영향도 함께 고려되어야 한다는 것을 잘 보여주고 있다.

이상의 논의에서 Fraser와 Eisenklam⁽²⁾과 Zhao 등⁽⁸⁾이 사용한 두가지 방법이 균일도를 나타내는데 모두 적절하지 않다는 것을 알 수 있다. 물리적으로 액적크기가 얼마만한 범위로 분포되어 있는가를 표현하는 균일도는 통계적인 측면에서 평균값을 기준으로 분포된 값들의 편차를 나타내는 표준편차(standard deviation, σ)와 직접 연관이 있다. 따라서 균일도는 통계적인 해석에서의 표준편차로 표현하는 것이 더 적절하다고 할 수 있다. Rosin Rammler 분포함수의 경우, 정의에 의해서 표준편차는 다음과 같이 구해지며(부록 참조),

$$\sigma = \bar{X} \left[\frac{2\Gamma(2/\delta)}{\delta} - \left\{ \frac{\Gamma(1/\delta)}{\delta} \right\}^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

표준편차는 앞서 논의한 바와 같이 \bar{X} 와 δ 를 함께 포함하고 있다. 참고로 이 표준편차가 크다는 것은 곧 넓게 분포되어 있다는 것을 의미하므로 균일도는 이 표준편차의 역수적 개념으로 표현된다.

본 연구에서는 분사액체의 점도가 분무액적의 평균크기뿐만 아니라 표준편차의 역수적 개념을 가지는 균일도에 주는 영향을 실험을 통하여 살펴보았다.

2. 실험

2.1 노즐 및 분사액체

본 연구에서는 와류형 분무노즐을 선정하였으며,

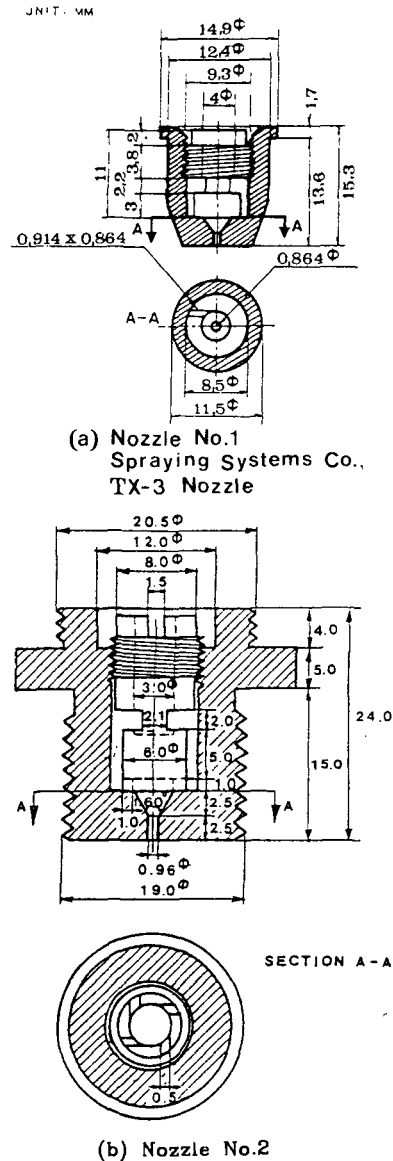


Fig. 2 Detail drawings of swirl spray nozzles

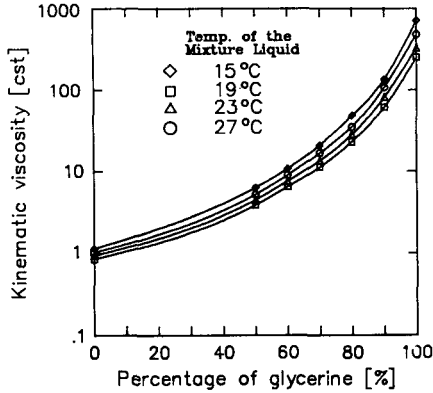


Fig. 3 Viscosity of the Glycerine-Water mixture

이 노즐의 원리는 다음과 같다. 노즐의 내부에서 분사액체는 접선 방향의 작은 흡을 통해서 와류실 (swirl chamber) 안으로 들어가면서 강한 와류를 얻게 된다. 이때 이 와류유동으로 인해 와류실 중심부에는 공기코어 (air core)가 형성된다. 이 상태에서 액체가 노즐을 벗어나면 축방향 속도성분과 접선방향 속도성분에 의하여 분사액체는 일단 속이 빈 원추형의 액체막을 형성하였다가 여러 분산요인에 의해 액적들로 미립화된다. 노즐은 Spraying Systems 사 제품인 TX-3 노즐과 자체 설계한 노즐 등 2개를 준비하였다. 구체적인 노즐의 구조와 첫수는 Fig. 2에 나타나 있다.

분사 액체로는, Tabata 등⁽⁶⁾이 사용하였던 것과 같이, 표면장력과 밀도는 거의 일정하게 유지하면서 점도의 변화를 크게 변화시킬 수 있는 글리세린과 물의 혼합물을 사용하였다. 글리세린과 물의 혼합비율에 따른 혼합물의 점도는 세관식 동점도계 (KRK, Type 4663, 4883)를 사용하여 측정하였으며 그 결과는 Fig. 3에 나타나 있다.

2.2 측정장치

본 연구에서 액적의 크기분포를 측정하기 위하여 사용되는 Malvern 2600 Series Laser Diffraction Particle Sizer 장치는 빛의 회절 (diffraction) 현상을 이용한 광산란 (light scattering) 측정장치로서 이의 구성은 Fig. 4에 나타나 있다. 이 장치의 자세한 측정원리는 Swithenbank 등⁽⁹⁾과 Hirleman 등⁽¹⁰⁾에 나타나 있고 이 장치의 정확도와 사용 한계에 대해서는 Dodge⁽¹¹⁾와 Meyer와 Chigier⁽¹²⁾ 등에 나타나 있다.

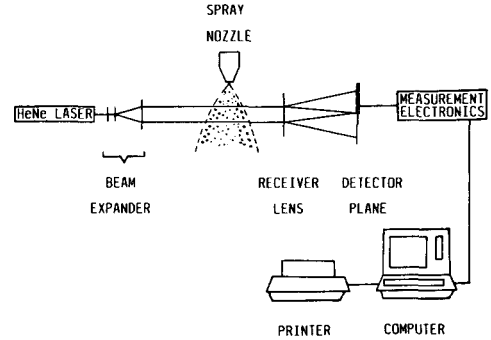


Fig. 4 Schematic diagram of the malvern 2600 particle sizer

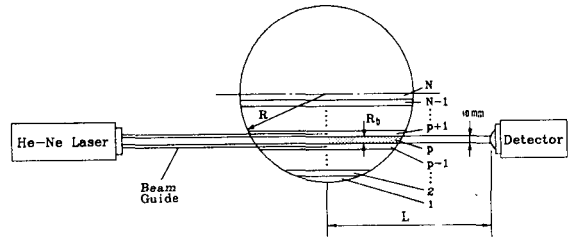


Fig. 5 Scanning of the laser beam over the spray cross-section

Malvern Particle Sizer는 직경 10mm의 레이저 광의 경로상에 있는 모든 액적들을 측정하기 때문에 (Fig. 5 참조), 이 장치에서 직접 얻는 결과는 분무액적의 크기와 분포를 적절히 표현한다고 볼 수 없다. 이러한 면을 보완하기 위해서 축대칭인 분무의 경우 이 장치에서 얻은 결과를 이용해서 반경방향에 따르는 SMD의 분포와 분무단면 전체에 해당하는 SMD를 구하는 방법들^(13,14)이 보고되고 있다. Rosin-Rammler 분포식과 함께 Zhu 등⁽¹⁴⁾에 의한 전체 분무단면의 SMD를 구하는 방법을 확장하면, 다음과 같이 전체 분무단면에서의 액적 크기 분포를 구할 수 있다.

한 측정 위치에서 분무 액적이 가지는 총 체적 V_p 는 다음과 같다,

$$V_p = \pi R_0^2 L v_p \tag{7}$$

여기서 레이저광의 반경인 R_0 와 측정부위의 길이 L 은 일정하게 유지할 수 있고 분무액적의 체적 농도 (volume concentration)인 v_p 는 Malvern Particle Sizer에서 직접 측정되는 값이다. 본 실험의 경우에는 L 의 길이는 30cm로 취하였다. 식 (2)를 이용하여 각 측정 위치에서 얻어진 SMD_p와 V_p

에 의해 그 측정위치에서 분무액적이 가지는 총 표면적을 구할 수 있다. 이렇게 각 측정 위치에서 구한 총 체적과 총 표면적을 더하면 분무 단면에서 전체 분무액적이 가지는 체적의 합과 표면적의 합을 구할 수 있다. 그런 후 식(2)를 한번 더 이용하면 분무단면 전체에 해당하는 SMD를 구할 수 있다. 이를 수식화하면

$$SMD_i = \sum_{p=1}^N V_p / \left\{ \sum_{p=1}^N (V_p / SMD_p) \right\} \quad (8)$$

이며 여기서 하첨자 i 와 p 는 각각 전체 단면과 측정위치를 의미한다. 이렇게 분무 단면에서의 SMD를 구하는 기본 개념은 각 측정위치에서 측정된 V_p 로 측정결과에 비중(weight)을 준 것으로 해석될 수 있다. 이와 아울러 액적의 크기분포로서 Rosin-Rammler 분포함수를 사용하면 각각의 측정위치에서의 액적들의 크기에 따른 누적체적 분포는

$$V_p \cdot f_p(x) = V_p \cdot e^{-(x/\bar{x}_p)\delta_p} \quad (9)$$

가 된다. 따라서 전 분무단면에 해당하는 크기분포는

$$f_i(x) = \sum_{p=1}^N V_p \cdot e^{-(x/\bar{x}_p)\delta_p} / \sum_{p=1}^N V_p \quad (10)$$

로 나타나며, 식(10)으로 부터 구해지는 SMD는 식(8)과 동일하다. 그런데 식(10)은 각 측정위치에서의 분포함수의 합으로 표현되고 이 식으로는 분무단면 전체의 액적의 크기분포와 관련된 분포변수를 구하기 어려우므로, 분무단면 전체에 해당하는 Rosin-Rammler 분포식 $f_a(x)$ 을 가정한 후, 최소자승방법을 이용하여

$$Error = \int_0^{\infty} \{f_i(x) - f_a(x)\}^2 dx \quad (11)$$

를 최소로 하는 분포변수 \bar{X} 와 δ 를 구한다.

2.3 실험장치

본 연구를 위해 제작된 실험장치는 Fig. 6에 나타나 있다. 분사액체는 가연성이 없는 고압의 질소에 의해 가압되며 압력용기는 10기압까지 견딜 수 있도록 제작되었다. 실험챔버(test chamber)는 10 mm 두께의 투명 아크릴로 만들어진 상자(60cm×60cm×100cm)로서, 가압된 분사액체는 이 실험챔버 상부에 설치된 노즐을 통하여 아래로 분사된다. Malvern Particle Sizer의 레이저 광과 액체분무와의 상대적인 위치를 변화시키기 위해서, 노즐은 1 mm씩 상하 좌우로 움직일 수 있는 이송장치에 부착하였다. 실험챔버에는 분무액적들에 의해 산란된 빛이 수광렌즈(receiver lens)를 벗어나는 현상인

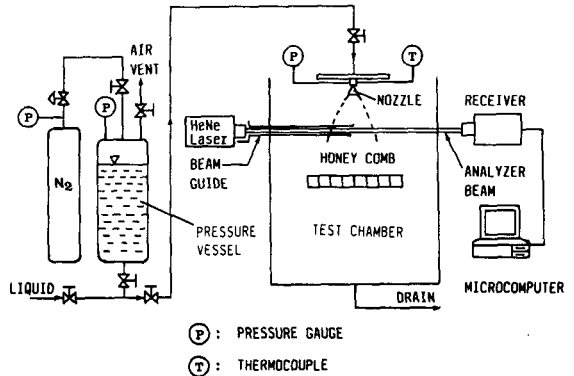


Fig. 6 Schematic diagram of experimental set-up

vignetting 현상과 다중산란(multiple scattering) 효과를 제거하기 위하여 빔 가이드(beam guide)가 설치되어 있어서 Malvern Particle Sizer의 레이저 광은 이 빔 가이드를 지나서 분무지역과 만나게 된다. Malvern Particle Sizer의 수광렌즈는 6~560 마이크로미터 범위의 액적크기를 측정할 수 있는 초점 길이 300mm 렌즈를 사용하였다. 실험챔버의 중간 높이 부분에는 분무 액적이 바닥에서 튀어 오르는 것을 방지하고, 아울러 미세한 분무액적들이 실험챔버 내에서 재순환되는 것을 줄이기 위해서 하니콤(honey comb)을 설치하였다.

노즐 내의 분사압력과 온도를 측정하기 위하여 Bourdon type 압력계(협성계공, KSB 5305), T-type Thermocouple 과 Thermometer (YEW, Type 2575-10)등을 사용하였고, 노즐로 공급되는 유량은 직접 매스실린더에 받아 측정하였다.

2.4 실험조건 및 예비실험

실험에 앞서 분사액체의 점도와 분사압력의 실험 범위는 각각 1~16.3cst, 294~736kPa로 정하였다. 그렇지만 측방향 거리에 따라 분무액적의 크기와 분포는 상당히 차이가 날 수 있어서 적당한 측방향 측정위치를 결정해야 한다. 이를 위해서, 노즐 No. 2를 사용하여 점도가 1 cst인 물에 대해 압력이 가장 낮은 294kPa과 가장 높은 736kPa 일 때 노즐로부터 3~20cm까지 측방향 거리를 변화시켜 액적크기를 측정하는 예비실험이 수행되었으며, 이 측정결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)에는 측방향 거리에 따르는 SMD의 변화가 나타나 있다. SMD는 측방향 거리에 따라 초기에 감소하다가, 6 cm 근처에서 최소값을 가지고 이후 계속 증가한

다. 이러한 경향은 분무액적의 속도와 밀접한 관련이 있다. 분사 초기에 크기가 작은 액적들은 큰 액적들 보다 빨리 감속되기 때문에 측정체적 내에서 작은 액적들이 머무는 시간이 상대적으로 길어져서 SMD는 작게 구해진다. 그러다가 더 하류로 내려가면 결국에는 큰 액적들의 속도도 함께 감소되므로, 이 큰 액적들이 측정체적안에 머무르는 시간도 점차로 길어지게 된다. 따라서 평균액적크기인 SMD는 축방향 거리에 따라 초기에는 감소하다가 최소값을 가진 후 다시 증가하는 경향을 가진다⁽¹⁶⁾. Fig. 7(b)에 나타난 \bar{X} 의 경우에서도 SMD와 대체로 비슷한 경향이 보여지고 있다. 한편 Fig. 7(c)에서 보여지듯이 δ 는 축방향 거리가 증가함에 따라 계속해서 증가하며, 분사압력이 낮은 경우에 큰 값을 가진다. 따라서 만약 Zhao 등⁽⁸⁾과 같이 δ 만으로 균일도를 평가한다면 낮은 압력의

경우가 높은 압력의 경우보다 균일도가 좋은 것으로 해석될 수도 있다. 그러나 식 (6)에서 정의한 표준편차의 변화를 보인 Fig. 7(d)이 경우에는 분사압력이 높을 때가 낮을 때에 비해 표준편차가 작아 보다 균일한 액적크기를 가지는 것으로 나타났다. 이것은 분사압력이 낮을수록 \bar{X} 가 크기 때문이다(Fig. 7(b) 참조). 따라서 표준편차에서 \bar{X} 의 영향이 상당히 크다는 것을 의미하며, δ 만을 고려하는 것은 역시 많은 제한이 있음을 보여주고 있다. 바꾸어 말하면, 분무액적의 균일도를 어떻게 표현하는가에 따라 상반된 결론을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 또 표준편차는 축방향 거리가 증가함에 따라 계속 감소하여 액적의 균일도는 좋아진다. 이 결과는 Chin 등⁽¹⁵⁾과 Mao 등⁽¹⁶⁾의 결과와 일치한다. 이상의 결과에서 분무 액적들이 주위공기와 충분한 운동량 교환이 이루어져 평균 직경과 표준편차가 크게 변하지 않거나 일정하게 변한다고 여겨지는 노즐로 부터의 축방향 거리 12cm를 측정 위치로 잡았다.

3. 실험결과 및 검토

Fig. 8은 분사액체가 점도에 따른 SMD의 변화

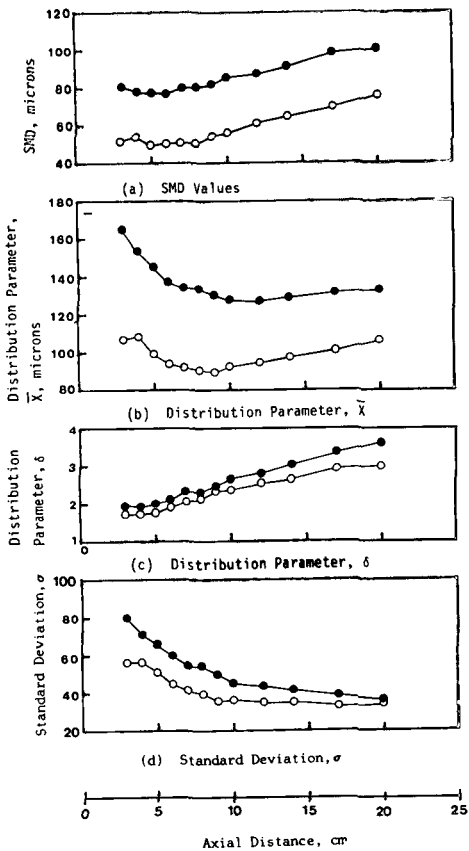


Fig. 7 Influence of the axial distance on the SMD, distribution parameters \bar{X} and δ , and the standard deviation σ (nozzle No. 2, injection pressures, ● : 294 kPa, ○ : 736 kPa)

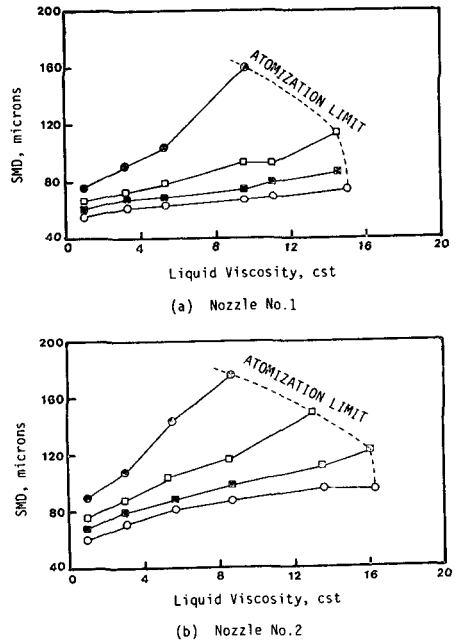


Fig. 8 Effect of liquid viscosity on the SMD values (injection pressures, ● : 294 kPa, □ : 442 kPa, ■ : 589 kPa, ○ : 736 kPa)

를 보여준다. 기존의 연구들^(1~7)에서 보고된 바와 같이 액체의 점도가 증가함에 따라 *SMD*가 증가한다는 사실을 본 실험결과에서도 확인할 수 있다. 그러나 본 실험의 경우에는 식(1)의 *a* 값이 분사압력에 따라 0.11~0.54의 범위로 구해져서 기존의 연구결과^(3~5,7)에서의 0.15~0.25의 범위와는 차이를 보이고 있다. 또한 이 *a* 값은 상수(constant)가 아니라 분사압력의 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉 분사압력이 높아지면서 *a* 값은 감소하는데 본 실험조건에서 높은 분사압력의 경우에는 그 값이 대체로 기존의 연구결과와의 범위 안으로 들어간다. 이것은 분사압력이 낮을수록 점도의 영향이 크다는 것을 의미하며, 같은 경향이 Tabata 등⁽⁶⁾의 실험결과에서도 나타나고 있다. 본 연구에 비해 분사압력의 범위가 넓은 그들의 실험을 살펴보면 분사압력이 증가함에 따라 초기에는 *a*가 큰 값으로부터 감소하다가 분사압력이 계속하여 증가하면 *a* 값은 거의 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이러한 사실은 Rizk나 Lefebvre⁽¹⁷⁾의 연구결과에서도 추정해볼 수 있다. 그들은 낮은 분사압력에서는 액체막의 두께가 분사액체의 점도에 따라 크게 변한다고 보고하고 있으며, 분무액체의 크기는 액체막의 두께에 의해 결정되므로, 결국 낮은 분사압력에

서는 분무액체의 점도가 액적크기에 주는 영향이 크게 나타난다.

아울러 점도가 증가함에 따라 미립화를 위한 최소한의 분사압력이 높게 나타난다. 이는 분사액체의 점도가 증가함에 따라 유동의 마찰저항이 증가하므로 와류실 내에서 미립화에 필요한 충분한 정도의 와류가 생성되지 않기 때문이다.

Fig. 9는 분사액체의 점도가 Rosin-Rammler 함수의 분포변수 \bar{X} 및 δ 에 미치는 영향을 보여준다. 분사액체의 점도가 증가함에 따라 δ 는 1.7~3.4 범위에서 변하고 있으며 일정적이지는 못하지만 전체적으로 감소하는 경향을 가진다. 이 결과는 Zhao 등⁽⁸⁾의 결과와는 상반되며, 그 이유로는 측정위치의 차이가 가장 큰 원인이라고 추정된다. 다시 말해서, 그들이 특별히 밝히지는 않았으나 보통의 경우 Malvern Particle Sizer를 사용할 때 레이저 광이 분무 중심축을 통과하는 경우만을 측정체적으로 하고 있으므로, 본 실험에서와 같이 분무단면 전체를 고려하는 경우 [식 (7)~(11) 참조]와는 차이가 나는 것으로 보인다. 또한 그들의 실험에서는 점도변화의 영역이 본 실험의 경우에 비해서는 매우 좁은 1.4~2.48 cst 정도 있다는 것도 고려의 대상이 될 수 있다. 왜냐하면 Fig. 9에

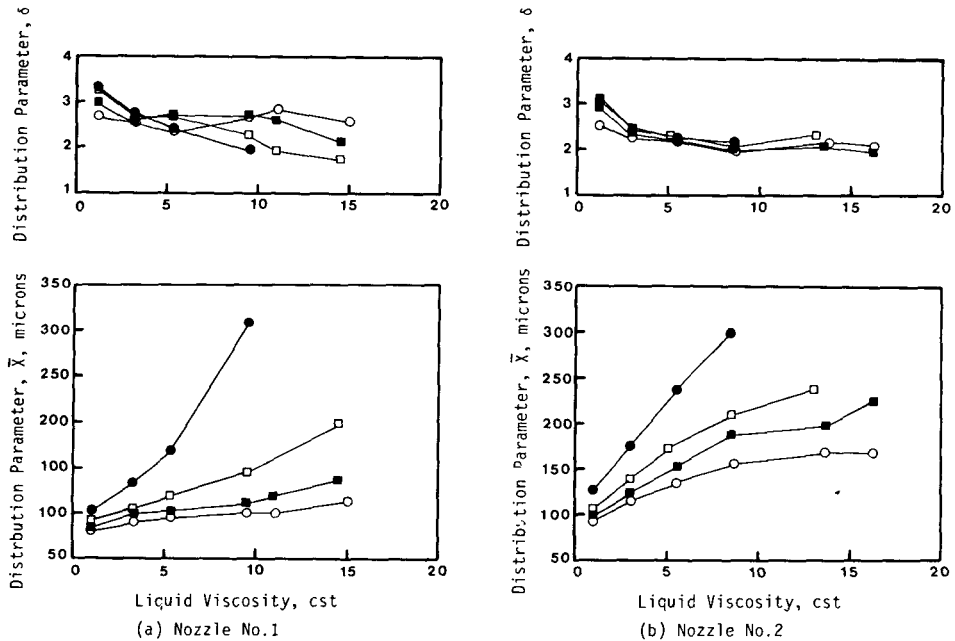


Fig. 9 Effect of liquid viscosity on the distribution parameters \bar{X} and δ (injection pressure, ● : 294 kPa, ◻ : 442 kPa, ■ : 589 kPa, ○ : 736 kPa)

서 Zhao 등의 실험에 해당하는 3cst 이하에서는 분사압력이 증가하면 δ 값이 감소하여 그들의 결과와 일치하지만 점도가 10 cst 이상에서는 그 경향이 반대로 나타나고 있어서, 그들의 결과가 국부적인 경향일 수도 있다는 것이다. 한편 분사액체의 점도가 증가함에 따라 \bar{X} 는 증가한다. \bar{X} 가 증가하는 경향은 SMD의 경우와 흡사하며, 분사압력이 낮을수록 점도의 영향이 크게 나타난다. 이상의 결과를 종합하면 분사액체의 점도가 증가하면 전체적으로 δ 는 감소하며 \bar{X} 는 증가하므로, 이것은 둘 다 균일도가 나빠지는 것을 의미한다[식 (6) 참조]. 다시 말해서 분사액체의 점도가 증가함에 따라 액적의 크기는 넓은 범위에 걸쳐 분포한다는 것이다.

Fig. 10은 식(6)에 의해 \bar{X} 와 δ 로 부터 계산된 표준편차를 보여준다. 앞서 Fig. 9에서도 어느 정도 추측할 수 있었듯이 점도가 증가함에 따라 표준편차가 증가하며, 분사압력이 감소함에 따라 표준

편차는 증가한다. 또 표준편차의 경우에서도 분사압력이 낮을수록 점도의 영향이 크게 나타나고 있다. 따라서 점도가 작고 분사압력이 높을수록 액적 크기의 분포가 균일한 분무를 얻을 수 있으며, 이 결과는 Fraser와 Eisenklam⁽²⁾의 결과와 일치한다.

4. 결 론

액체의 점도가 분무액적의 균일도에 어떠한 영향을 주는가를 조사하기 위하여 와류형 분무노즐을 사용하여 일련의 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 균일도의 척도로서 통계적 해석에서 사용되는 표준편차의 역수적 개념을 도입하였으며, 종합적으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 노즐로부터의 축방향 거리에 따라 액체분무의 SMD는 감소하여 일단 최소값에 달한 후 다시 증가하며, 액적크기 분포도 보다 균일해진다.

(2) 분사액체의 점도가 증가함에 따라 SMD와 표준편차는 모두 증가하여 액적들은 넓은 크기분포 상태를 가진다. 따라서 분사액체의 점도가 클수록 액적의 크기가 전체적으로 크면서 넓게 분포된 액체분무가 된다.

(3) 분무액적의 SMD와 표준편차에 분사액체의 점도가 주는 영향은 분사압력이 낮을수록 크게 나타난다.

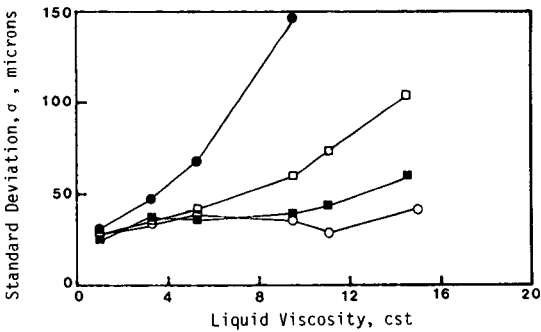
본 실험에서는 장치의 한계상 비교적 낮은 압력에서 실험이 수행되어, 보다 넓은 점도 범위에서의 실험은 할 수 없었다. 그러나 실용적인 측면을 고려해 볼 때 넓은 점도의 범위에 대한 지속적인 연구가 추후 연구로서 이루어져야 할 것이며, 아울러 충분한 실험 결과를 토대로 균일도에 관련된 실험 관계식의 형태를 얻는 작업도 수반되어야 할 것이다.

후 기

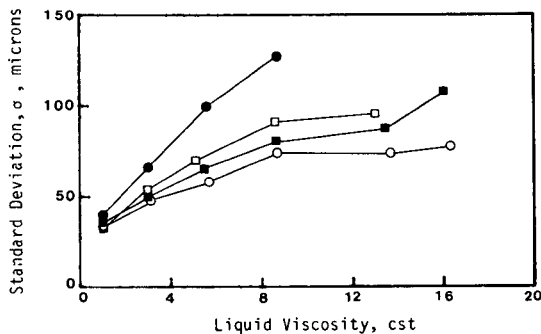
본 연구는 한국과학재단 1988년도 목적기초연구사업의 일환으로 수행되었으며 이의 연구비 지원에 대해 재단 관계자들에게 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

(1) Giffen, E. and Muraszew, A.M., 1953, "The Atomisation of Liquid Fuels", Wiley, New York.



(a) Nozzle No.1



(b) Nozzle No.2

Fig. 10 Effect of the liquid viscosity on the standard deviation (degree of uniformity) of the drop size distribution (injection pressure, ● : 294 kPa, ◻ : 442 kPa, ■ : 589 kPa, ◯ : 736 kPa)

- (2) Fraser, R. P. and Eisenklam, P., 1956, "Liquid Atomization and the Drop Size of Sprays", *Trans. Inst. Chem. Engrs*, Vol. 34, pp. 294~313.
- (3) Radcliff, A., 1960, "Fuel Injection, High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion", Vol. 6, Section D, Princeton University Press, Princeton, NJ, cited in A. H. Lefebvre, 1987, "The Prediction of Sauter Mean Diameter for Simplex Pressure-swirl Atomisers", *Atomisation and Spray Technology*, Vol. 3, pp. 37~51.
- (4) Dombrowski, N. and Tahir, M. A., 1977, "Atomization of Oils by Swirl Spray Pressure Nozzles", *J. Inst. of Fuel*, pp. 59~67.
- (5) Jasuja, A. K., 1979, "Atomisation of Crude and Residual Fuel Oils", *Trans. ASME, J. of Eng. for Power*, Vol. 101, pp. 250~258.
- (6) Tabata, M. Arai, M. and Hiroyasu, H., 1985, "Effect of Fuel Viscosity and Surface Tension on Diesel Spray Drops", *Proceedings of ICLASS-85*, pp. IIB/1/1-IIB/1/8.
- (7) Lefebvre, A.H., 1987, "The Prediction of Sauter Mean Diameter for Simplex Pressure-swirl Atomisers", *Atomisation and Spray Technology*, Vol. 3, pp. 37~51.
- (8) Zhao, Y. H., Hou, M. H. and Chin, J. S., 1986, "Dropsizes Distributions from Swirl and Airblast Atomizers", *Atomisation and Spray Technology*, Vol. 2, pp. 3~15.
- (9) Swithenbank, J., Beer, J. M., Tayler, D. S., Abbot, D. and McCreath, G. C., 1976, "A Laser Diagnostic Technique for the Measurement of Droplet and Particle Size Distribution", *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 53, pp. 421~447.
- (10) Hirleman, E. D., Oechsle, V. and Chigier, N. A., 1984, "Response Characteristics of Laser Diffraction Particle Size Analyzers : Optical Sample Volume Extent and Lens Effects", *Optical Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 610~619.
- (11) Dodge, L. G., 1984, "Calibration of the Malvern Particle Sizer", *Applied Optics*, Vol. 23, No. 14, pp. 2415~2419.
- (12) Meyer, P. and Chigier, N., 1986, "Dropsizes Measurements Using a Malvern 2200 Particle Sizer", *Atomisation and Spray Technology*, Vol. 2, pp. 261~298.
- (13) Hammond, D. C. Jr, 1981, "Deconvolution Technique for Line-of-sight Optical Scattering Measurements in Axisymmetric Sprays", *Applied Optics*, Vol. 20, No. 3, pp. 493~499.
- (14) Zhu, H. M., Sun, T. Y. and Chigier, N., 1987, "Tomographical Transformation of Malvern Spray Measurements", *Atomisation and Spray Technology*, Vol. 3 pp. 89~105.
- (15) Chin, J. S., Nickolaus, D. and Lefebvre, A. H., 1986, "Influence of Downstream Distance on the Spray Characteristics of Pressure-swirl Atomizers", *J. of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 108, pp. 219~224.
- (16) Mao, C. P., Wang, G. and Chigier, N., 1986, "The Structure and Characterization of Air-assisted Swirl Atomizer Sprays", *Atomisation and Spray Technology*, Vol. 2, pp. 151~169.
- (17) Rzik, N. K. and Lefebvre, A. H., 1986, "Influence of Liquid Properties on the Internal Flow Characteristics of Simplex Swirl Atomisers," *Atomisation and Spray Technology*, Vol. 2, pp. 219~233.