

〈論 文〉

이중분무 교차지역에서의 액적유동특성의 통계학적 분석에 관한 연구

조대진* · 윤석주** · 최태민***

(1993년 7월 5일 접수)

A Study on the Statistical Analysis of the Flow Characteristics of Droplet in the Cross Region of Twin Spray

Dae-Jin Cho, Suck-Ju Yoon and Tae-Min Choi

Key Words : Turbulence Characteristics(난류특성), Cross Region(교차영역), PDA (particle dynamic analyzer), Statistical Analysis(통계학적 해석), SMD(체적-표면적 평균 직경), Twin Spray(이중분무)

Abstract

This study investigated mainly on the flow characteristics of a droplet in the cross region of twin spray. The velocities of the droplet were measured along the axial and radial direction, and the flow characteristics of the droplet were statistically analyzed. For the statistical analysis, the probability density of the turbulent components has been studied, and then the Reynolds shear stress, the skewness and the flatness factors were calculated, and compared with the Gaussian value. Two pressure swirl atomizers were used for the twin spray system and kerosene was employed as the working liquid. 2-D PDA (particle dynamic analyzer) was used for the purpose of the measurement of droplet size and velocities. As a result, it was found that (1) the droplets collision was taken place strongly in the cross region. So, a large momentum loss of droplets due to the loss of natural movement direction was occurred, and momentum loss of radial direction was greater than that of axial direction. (2) The axial direction skewness factor approached to zero like the Gaussian distribution in the cross region of twin spray. (3) In the cross region of twin spray, the fluctuation instability of droplet was increased because of the development of the turbulence characteristics due to the droplet collision.

기 호 설 명

<p>$F(u')$: 파동속도의 U 성분 편평도</p> <p>N_1, N_2 : 노즐</p> <p>N_1 : 1차원 히스토그램(histogram)의 총 빈도수</p> <p>N_2 : 2차원 히스토그램의 전체 빈도수</p>	<p>n : 히스토그램의 구간수</p> <p>$p(u')$: 1차원 확률밀도함수</p> <p>$p(u', v')$: 결합 확률밀도함수</p> <p>r_j : 1차원 히스토그램에서 j번째 구간에 존재하는 빈도수</p> <p>r_{ij} : 2차원 히스토그램에서 ij번째 구간에 존재하는 결합빈도수</p> <p>$S(u')$: 파동속도의 U 성분 비대칭도</p>
---	--

*전북대학교 기계공학과 대학원

**정희원, 전북대학교 기계공학과

***정희원, 한국기계연구원 기계부품부

\bar{U}, \bar{V}	: Z, X 방향성분의 평균속도
\bar{U}_c	: 분무중심축의 국부 평균속도
u', v'	: Z, X 방향에서의 파동속도
$\Delta u', \Delta v'$: 각 파동속도의 증가분
X	: 분무 반경방향
Y	: 분무 종단면방향
Z	: 분무 축방향

1. 서 론

최근 액체의 미립화는 액체연료의 연소와 분무건조, 도장 및 농약 살포, 액체금속의 분말제조 등 여러 분야에 유용하게 이용되면서 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 사용목적에 따라 요구되는 특성이 크게 다르기 때문에 목적과 요구에 대한 충분한 분석에 의한 미립화방법의 선택이 중요하다. 따라서 실용성, 효율성, 생산성 등을 고려하여 최근 다수의 노즐을 병렬로 배치하여 동시 분사하는 경우로서 분무 건조장치, 산업용 보일러, 버너 등의 산업용 분무시스템이 있는데 이러한 다중분무는 단일분무에 비해 많은 양의 액체를 미립화시킬 수 있고, 단시간에 높은 발열량을 얻을 수 있으며, 이단 점화제어에 의해 온도변화의 안정성을 도모하고 분무유량의 원활한 제어로 연료소비면에서 경제적이다.

다중분무에서의 분무간섭은 분무단면 변화, 액적 크기 변화와 액적들의 운동량변화에 기인한 속도특성변화 등을 야기시키기 때문에 단일분무구조와 비교하여 전체적인 분무구조에 크게 영향을 미칠 것이다. 따라서 이에 관련한 국내외적 연구^(1,2)가 수행되고 있는데, Adams⁽³⁾는 SMD가 59 μm 인 액적을 생성하는 와류분무노즐을 동시 분사시켰을 때 분무간섭지역에서 SMD가 증가함을 관찰하였으며 Crosby⁽⁴⁾는 이 현상을 액적들간의 충돌에 의한 합착으로 분석하였고, 김인구 등⁽⁵⁾은 두 노즐간의 거리와 분사압력 변화에 따른 이중분무형태를 고찰하였다.

이중분무는 교차영역에서 분무간의 상호간섭이 발생되기 때문에 이 지역에서의 주위 기체유입과 액적충돌에 의한 액적크기 변화, 액적속도 변화에 기인한 난류성분 변화 등의 분무간섭현상은 분무구조에 큰 영향을 미치기 때문에 분무구조와 유동특성을 규명할 필요가 있다.

일반적으로 종래에는 SMD가 대표적으로 분무특성을 나타내는 주요 인자로 되어 있어서 분무에 관한 많은 실험들이 액적직경을 측정, 분석하는데 주력해 왔으나 액적의 체적, 주위기체의 유입 영향 등의 분무의 유동특성 또한 분무를 표현하는 대표적인 인자이다. 본 연구에서는 액적유동에 관한 관점에서의 분석을 시도하기 위해 액적의 속도분포, 분무연소시 연소능력 여부를 평가할 수 있는 난류강도분포, 분무액적들의 난동에 의한 각 방향으로의 운동량 변화율을 예측할 수 있는 난류 전단응력 분포, 분무의 구조를 통계학적으로 처리하기 위해 난류성분의 중요한 통계학적 특성치인 비대칭도와 편평도에 대해서 분석하였다.

따라서 본 연구에서는 이중분무의 교차지역에서 분무구조와 액적들의 유동특성을 측정 분석하고 액적의 난류성분들을 분석하기 위하여 액적의 크기와 속도성분을 동시에 측정이 가능한 PDA (particle dynamic analyzer) 시스템을 사용하여 교차영역에서의 액적의 평균직경 변화와 액적의 평균속도, 난류강도를 측정하고 비대칭도, 편평도 등의 난류의 통계학적인 분석^(6,7)을 시도하였다.

2. 통계학적 해석

일반적으로 난류유동은 매우 복잡하고 무질서한 유체입자들의 운동으로 매우 복잡한 3차원 유동을 이루어 시간과 거리 및 방향에 따라 수시로 변화한다. 이같은 난류유동을 정확히 해석하기 위해서는 통계이론⁽⁸⁾을 적용하여야 한다.

난류성분들의 분포는 측정위치에서 평균값을 기준으로 파동성분들의 양과 음의 값의 주기적 발생을 일정 시간동안 각 구간에서 누적평균하여 나타낸다. 난류신호의 빈도수에 의한 확률은 총 빈도수에 대하여 정해진 시간동안 각 구간에 누적된 빈도수로 정의되며 일정 구간내에서 난류발생의 빈도수에 대한 확률은 다음과 같다.

$$P(u_j) = p(u_j) \Delta u_j = r_j / N_i \quad (N_i = \sum_{j=1}^{n_i} r_j)$$

따라서 1차원 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$p(u_j) = \frac{P(u_j)}{\Delta u_j} = \frac{r_j}{\Delta u_j N_i}$$

$$\sum_{j=1}^m p(u_j) \Delta u_j = \int_{-\infty}^{\infty} p(u_j) du' = 1 \quad p(u_j) \geq 0$$

두 난류성분의 결합에 의하여 형성되는 시간에 대한 결합 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$p(u_i, v_j) = \frac{P(u_i, v_j)}{\Delta u_i \Delta v_j} = \frac{r_{ij}}{\Delta u_i \Delta v_j N_2}$$

$$N_2 = \sum_{i=1}^{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} r_{ij}$$

$$\sum_{i=1}^{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} p(u_i, v_j) \Delta u_i \Delta v_j = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(u', v') du' dv' = 1$$

$$p(u_i) = \sum_{j=1}^{n_2} p(u_i, v_j) \Delta v_j$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} p(u', v') dv'$$

$$p(v_i) = \sum_{j=1}^{n_2} p(u_i, v_j) \Delta u_i$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} p(u', v_j) du' \quad p(u_i, v_j) \geq 0$$

난류성분에 의하여 발생하는 모멘트(moment)들을 구하는 식을 살펴보면, 1차원 확률밀도함수를 이용하는 경우 m 차의 난류 모멘트식은

$$\overline{u'^m} = \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{n_1} r_j (u_j' - \bar{u}')^m$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} (u' - \bar{u}')^m \cdot p(u') du'$$

이 되며, 결합 확률밀도함수를 이용하는 경우 m 차의 난류 모멘트식은

$$\overline{u'^m} = \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} r_{ij} (u_j' - \bar{u}')^m$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} (u' - \bar{u}')^m \cdot p(u', v') du' dv'$$

을 만족한다.

위의 식에서 $m=2$ 의 값을 갖는 경우는 난류의 세기를 표현하는 난류강도(turbulence intensity)를 나타내며 variance를 의미한다. 또 $m=3$ 의 값을 $m=2$ 의 3/2승으로 나눈 값을 비대칭도(skewness factor or asymmetry coefficient)라 하여, 난류의 대칭성을 판정하고 난류신호 u' 에 대한 비대칭도는 다음식으로 정의된다.⁽⁹⁾

$$S(u') = \frac{\overline{u'^3}}{(\overline{u'^2})^{3/2}}$$

비대칭도는 Gauss 표준 정규분포에서는 0의 값을 갖는다.

그리고, $m=4$ 의 값을 $m=2$ 의 2승으로 나눈 값을 편평도(flatness factor or kurtosis or coefficient of excess)라 하여 난류발생의 간헐성(intermittency)을 분석할 수 있으며, 다음식으로 정의된다.⁽⁹⁾

$$F(u') = \frac{\overline{u'^4}}{(\overline{u'^2})^2}$$

편평도는 Gauss 표준 정규분포에서는 3의 값을 갖는다.

두 방향 난류성분들의 결합에 의한 2차 이상의 난류 모멘트식(joint moment product)은

$$\overline{u'^m v'^n} = \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} r_{ij} \cdot (u_j' - \bar{u}')^m \cdot (v_j' - \bar{v}')^n$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (u' - \bar{u}')^m \cdot (v' - \bar{v}')^n \cdot p(u', v') du' dv'$$

(단, $m, n=1, 2, 3, \dots$)

로 나타내며, 특히 $m=n=1$ 인 경우에는 난류 전단응력 즉, Co-variance를 의미한다.

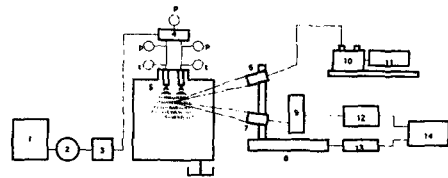
3. 실험장치 및 측정방법

3.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이 기본적으로 이중분무를 발생시키기 위한 분사장치와 측정 분석하기 위한 측정장치로 구성된다.

분사장치의 시험부는 한번의 길이가 60 cm이고 높이가 150 cm인 직육면체로 외부공기의 영향을 차단하고 분무형상의 육안관찰을 목적으로 투명 아스티지를 외부에 설치하였으며, 위면과 아래면에 분무의 재순환방지를 위한 가는 망을 설치하였다. 분무액체는 상온의 백등유(kerosene)를 사용하고 분사압력은 0.69 MPa로 고정하여 분사펌프로 가압하여 압력파이프를 통해 분사노즐로 압송되도록 하였다.

분사노즐은 Danfoss사의 와류압력식노즐로 분무



- | | |
|------------------------|----------------------------|
| 1: Fuel Tank | 8: Traversing Unit |
| 2: pump | 9: PM |
| 3: Accumulator | 10: Transmitter |
| 4: Distributor | 11: Laser |
| 5: Nozzle | 12: Burst Signal Processor |
| 6: Transmitting Optics | 13: Transmitting Control |
| 7: Receiving Optics | 14: Computer |
- p: Pressure measurement
t: Temperature measurement

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

각 60°, 분사유량 3.2 kg/h, Hollow cone type을 채택하였다. 펌프에서 발생하는 맥동현상과 압력변동을 감소시키기 위해 압력완충기(accumulator)와 분배기(distributor)를 설치하고 분사압력과 분사액체의 온도를 측정하기 위해서 노즐에 근접한 곳에 압력계와 온도계를 설치하였다.

3.2 계측기기 및 방법

사용된 계측기기는 액적의 크기와 속도성분을 동시에 측정가능한 DANTEC사의 PDA (particle dynamic analyzer)를 사용하였다.

계측장치는 광학계, 신호처리계, 컴퓨터로 구성되어 있는데 광학계는 광전달부와 산란광수집부로 구성되어 있으며, 광원은 2-D Ar-Ion Laser 2watt, 파장은 458, 514.4 nm이다. 광전달부는 Fiber flow optic으로 구성되어 있고, 산란광 수집부는 촛점렌즈와 광증폭기로 구성되어 있다. 촛점렌즈의 촛점거리는 모두 600 mm로 하였다. 측정체적은 최소지름 0.3 mm, 최대지름 0.9 mm인 타원 회전체로서 이 영역을 통과하는 입자에 의해 산란된 광은 산란광 수집부에 설치된 광 검출기에 의해 전기신호로 변환되고, 이 신호는 회로를 통하여 컴퓨터로 전달된다. 입자의 크기와 속도는 도플러신호의 상대적 위상차와 주파수에 의해 측정된다.

3.3 측정방법

본 연구에 사용된 노즐은 동일한 성능을 가진 다수의 노즐에 대한 유량측정과 사진판독, Patter-nator에 의한 유량분포 등의 예비실험을 통해 축대칭 분무분포를 갖는 노즐을 선정하여 사용하였으며, 실험조건을 일정하게 유지하기 위해 항온항습을 유지하고 분무가 충분히 안정된 후에 계측함으로써 실험결과와 재현성을 검증하였다.

측정위치는 분무현상을 사진촬영에 의하여 두 분무의 교차가 노즐선단으로부터 축방향으로 14 mm 이후에 발생함을 확인하여 예상되는 교차점 전후를 X , Y , Z 방향으로 측정분석하였다. 데이터 샘플링을 위한 광학부의 이송은 컴퓨터 프로그램으로 제어되는 3차원 자동이송장치를 사용하였다.

좌표계는 Fig. 2와 같이 두 분무의 교차지점을 기준으로 하여 분무 축방향을 Z , 분무 중단면을 Y , 분무 횡단면인 반경방향을 X 방향으로 정의하고 원점은 양 노즐출구의 중간점으로 하였다. 여기서 Z 방향 속도성분은 U , X 방향의 속도성분은 V

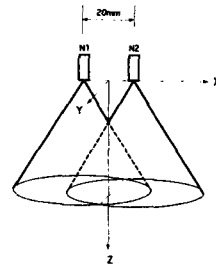


Fig. 2 Schematic diagram of twin spray

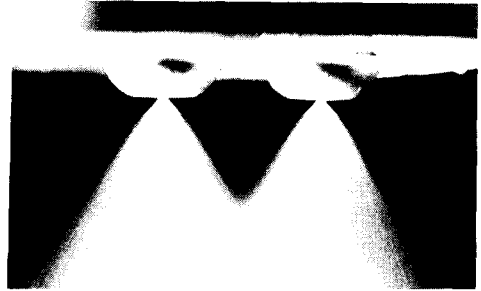


Fig. 3 Photograph of twin spray

라고 정의하고 두 노즐은 $N1$, $N2$ 로 표시한다. Fig. 3은 본 실험에 사용된 이중분무의 형상을 찍은 사진이다.

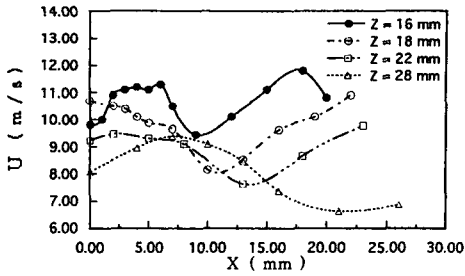
4. 실험결과 및 고찰

4.1 액적 평균속도

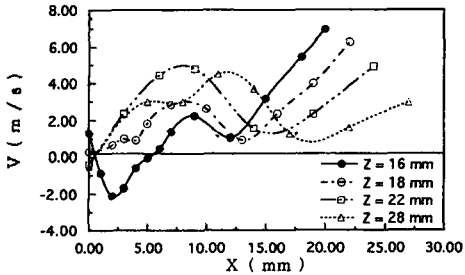
Fig. 4는 두 분무의 교차지역 중심 $Y=0$ 에서 반경방향 X 의 변화에 따른 액적 평균속도 성분 \bar{U} 과 \bar{V} 의 분포를 도시한 것이다. 축방향 속도성분 \bar{U} 의 분포는 교차이전인 $Z=16$ mm에서는 본 연구에 사용된 노즐 특성상 중공 원추형분무를 형성하기 때문에 $N2$ 노즐중심에 해당되는 $X=10$ mm 부근에서 최소값을 보이고 액적 밀집지역에 해당하는 $X=5$ mm 부근과 $X=15$ mm 이후에서 최대값을 보이고 있다.

하류인 $Z=22$, 28 mm에서는 중심부에서 점진적인 액적 평균속도 감소가 이루어지며 두 분무의 교차영역이 더욱 확대되기 때문에 $N2$ 노즐중심인 $X=10$ mm 이후 영역까지 $N1$ 노즐 분무간섭이 이루어져 최소의 액적 평균속도 위치가 $X=20$ mm 부근 이후까지 이동함을 알 수 있다.

X 방향 평균속도 \bar{V} 분포는 두 분무의 교차영역을 추측할 수 있도록 하는데 두 분무의 교차전인 $Z=$

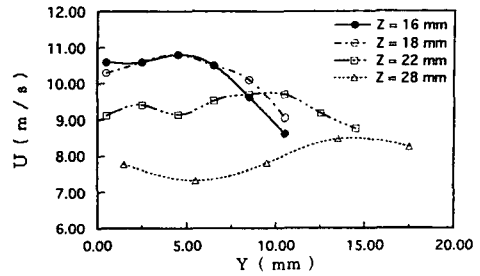


(a) Axial component (U)

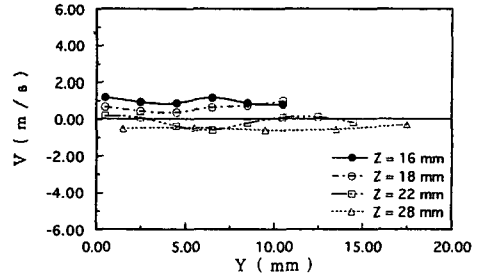


(b) Radial component (V)

Fig. 4 Distribution of mean drop velocity as function of X along Z-direction of twin spray



(a) Axial component (U)



(b) Radial component (V)

Fig. 5 Distribution of mean drop velocity as function of Y along Z-direction of twin spray

16 mm에서는 $X=0$ 에서 $N1$ 분무의 영향이 아주 미소하게 존재하고 X 방향으로 증가하면서 $N2$ 분무 외측부의 음의 방향 \bar{V} 성분으로 인해 음의 값을 보이고, 점차 $N2$ 분무 중심부로 이동하면서 중공 원추형분무 특성상 내부에 존재하는 재순환 영향으로 양의 값을 보인다. $X=10$ mm 이후의 두드러진 \bar{V} 의 증가는 $N2$ 분무의 양의 방향 \bar{V} 지역에 위치하기 때문이다. $Z=18$ mm에서는 두 분무의 교차가 활발히 일어나는 위치로서 $X=0$ 에서 $\bar{V}=0$ 이 되며 $N2$ 분무 안쪽으로 이동하면서 $N1$ 분무 외측부에 존재하는 액적들의 양의 \bar{V} 영향으로 양의 증가 현상을 보이고 있다. $X=8$ mm 부근의 정점(peak) 이후 외측부의 영역에서는 $N1$ 분무의 영향이 점점 감소하여 $N2$ 분무의 고유의 특성이 나타나며, 교차영역에서의 \bar{V} 값이 $Z=16$ mm의 값보다 증가하는 것은 $N1$ 분무폭이 점차 확산됨으로서 양의 영역이 확대되기 때문이다. 하류인 $Z=22, 28$ mm에서도 유사한 양상을 보이는데 $N2$ 분무 중심에서의 \bar{V} 최소값의 위치가 점차 증가, 확산되는 것은 $N1$ 분무의 영향이며 두 분무 교차지역의 분무폭 발달현상을 예측할 수 있다. $X=20$ mm 외측부에서는 $N2$ 분무 영향으로 급격한 \bar{V} 의 증가

를 보이며 Z 의 증가에 따라 더욱 확산되지만 액적의 운동량 감소로 \bar{V} 값은 감소하고 있다.

평균속도 성분분포로부터 충돌이 강하게 발생하는 $Z=18$ mm의 교차중심인 $X=0$ mm 부근에서 두 분무의 액적충돌 영향으로 방향성 상실에 기인하여 반경방향 속도성분이 거의 0에 근접하고, 축방향 속도성분은 상류지역보다 약간 증가한다. 이로써 반경방향의 운동량 상실이 축방향에 비해 크게 발생함을 알 수 있다.

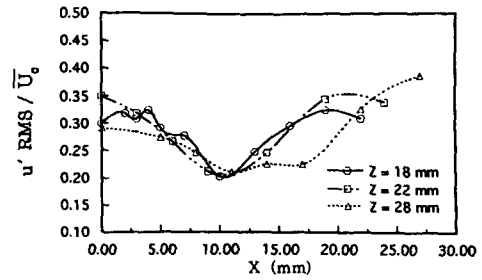
Fig. 5는 $X=0$ 에서 분무 종단면인 Y 방향 변화에 따른 평균속도 분포를 도시한 것이다. $Z=16$ mm에서는 두 분무의 교차가 이루어지지 않는 분무의 외곽부분에 해당되며 $Y=0$ 부근에서 $\bar{U}=10.5$ m/s정도의 균일한 속도를 보이나 그 후 Y 가 증가하면서 분무액적 존재영역 밖으로 벗어나 급격한 속도 감소를 보이고 있다. $Z=18$ mm에서는 두 분무교차가 강하게 일어나는 지역으로 빠르게 움직이는 액적들이 밀집된 부분이 교차지역으로 평균속도 값은 $Z=16$ mm와 유사한 값을 보이며 교차영역의 폭은 약간 증가하고 있다. 더욱 하류로 진행하면서 중심부에서는 속도값이 작고 외측부에서는 큰 속도값을 갖는데 이것은 분무특성이 중공 원추

형이기 때문이며 분무의 발달로 교차영역의 폭이 점차 증가하고 있다. X방향 속도성분인 \bar{V} 의 분포는 하류로 갈수록 주위 공기유입현상으로 액적들의 궤적이 분무 안쪽으로 휘어지고 중심부에서 액적들의 충돌에 의한 X방향 성분의 상실로 전단면에 걸쳐 균일하게 0에 근접한 값을 보이고 있다. 속도값이 완전히 0의 값을 갖지 않는 것은 본 실험규모의 미세함에 기인한 측정위치의 오차일 가능성과 본 실험에 사용한 노즐의 와류현상이 완전 대칭이 아니었을 가능성 등이 있으나 대체적으로 만족할만한 분포를 보이고 있다.

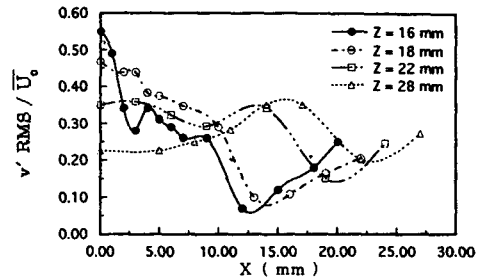
4.2 액적의 난류강도

분사유동에서 형성되는 유동입자들의 난동정도는 난류신호의 RMS(root mean square)에 의해 얻어지며 그의 세기는 평균속도에 대한 RMS의 비로 표시되는 난류강도(turbulence intensity)를 통해 분석할 수 있다.

Fig. 6은 이중분무 교차지역에서의 분무 축방향 Z변화에 따른 분무단면 방향 X로의 난류강도 분포를 도시화한 것이다. (a)는 액적유동 방향속도 성분의 난류강도 $\sqrt{\bar{u}'^2}/\bar{U}_c$ 분포를 도시한 것인데 Z의 변화에 관계없이 유사한 경향을 보이고 있는데, 두 분무의 교차로 인한 간섭영향을 받는 지역과 교차되지 않는 영역이 N2 분무중심인 X=10 mm 부근에서 최소값을 기준으로 대칭적 분포를 보인다. Z=18 mm, Z=22 mm에서는 간섭영향이 강한 지역(X=0 mm-X=10 mm)의 난류강도값이 간섭영향이 직접적으로 거의 존재하지 않는 영역(X=10 mm 이후)의 난류강도값과 5% 이내로 거의 같은 분포를 보인다. 두 분무의 교차중심인 X=0에서는 액적들간의 충돌에 기인한 불균일한 속도분포로 인해 상류인 Z=18 mm보다 Z=22 mm에서 비교적 큰 값을 보인다. 그러나 더욱 하류인 Z=28 mm에서는 교차중심부에서 난류강도의 감소를 보이는데 이것은 충돌된 액적들과 작은 액적들이 두 분무 교차에 의한 주위기체 유입의 차단으로 속도분포가 균일화된 것으로 판단되며 N2 분무의 외측부에서 더욱 큰 값을 보이는 것은 분무가 발달되면서 주위기체유입의 영향을 훨씬 크게 받기 때문이다. 따라서 두 분무의 교차지역에서의 액적 난동특성은 두 분무의 간섭영향으로 하류로 진행할수록 점차 감소하여 액적들의 속도변화가 균일해지고 분무 외측부에서는 원활한 주위 공기유입에 의



(a) Axial component (U)



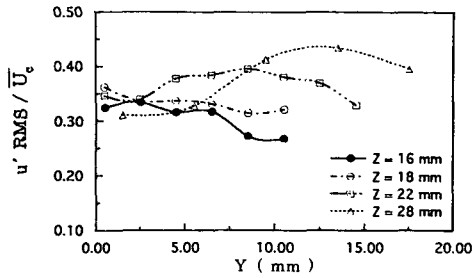
(b) Radial component (V)

Fig. 6 Distribution of turbulence intensity as function of Y along Z-direction of twin spray

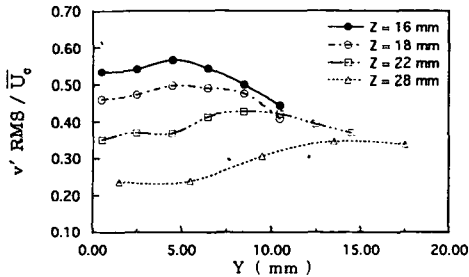
한 난동성분의 증가로 액적들의 불안정을 발생시키고 액적들의 운동량 변화가 활발함을 알 수 있다. (b)는 반경방향 속도성분 난류강도 $\sqrt{\bar{v}'^2}/\bar{U}_c$ 의 분포를 도시한 것으로 하류로 갈수록 교차중심부 X=0에서 값의 감소를 보이며 N2 분무 중심부근의 난류강도 값이 증가하는 것은 N1 분무의 영향으로 V방향의 불균일한 속도성분이 존재하는 영역이 점차 확대됨을 의미한다. 전반적으로 두 분무의 교차지역에서 액적충돌에 기인한 불균일한 속도분포로 인해 교차영역의 난류강도값이 간섭영향을 받지 않는 N2 분무 외측부의 난류강도 값보다 크게 나타난다.

축방향 성분의 난류강도는 분무의 간섭에 의해 크게 영향을 받지 않는다. 오히려 하류지역에서는 두 분무의 간섭영향보다 주위 기체유입의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다. 그러나, 반경방향 성분의 난류강도는 두 분무의 교차지역에서의 값이 주위 기체유입의 영향만을 받는 지역의 난류강도 값보다 크게 나타남을 알 수 있으며, 두 분무의 간섭영향을 축방향 성분보다 크게 받음을 알 수 있다.

Fig. 7은 분무 축방향 Z변화에 따른 Y방향으로



(a) Axial component (U)



(b) Radial component (V)

Fig. 7 Distribution of turbulence intensity as function of X along Z-direction of twin spray

의 난류강도 분포를 나타낸 것이다. (a)는 액적유동방향성분의 난류강도 $\sqrt{u'^2}/\bar{U}_c$ 를 도시한 것으로 $Z=18$ mm에서는 중심부에서 난류강도 값이 크고 외측부로 진행하면서 난류강도 값이 작아지고 있으며, 더욱 하류인 $Z=22, 28$ mm에서는 반대로 중심부보다는 외측부에서 더욱 큰 난류강도 값을 보이는데 이것은 주위 공기유입에 의한 난류의 발생으로 액적들의 불안정성과 운동변화가 활발하기 때문이다. (b)는 반경방향 속도성분 V 의 난류강도 $\sqrt{v'^2}/\bar{U}_c$ 로 도시한 것으로 중심부에서 외측부보다 비교적 작은 난류강도값을 갖는데 중심부에서는 두 분무의 간섭으로 인하여 주위 공기유입이 원활하지 못하여 난류발달이 방해되고 외측부에서는 주위 공기의 원활한 유입에 의한 난류의 발달로 액적들의 난동특성을 증가함을 알 수 있다.

4.3 난류 전단응력

난류 전단응력은 공간상의 한점에서 각 방향으로 유동하는 난류성분중 2방향 난류성분의 운동량 변화에 의하여 발생하는 것으로 Reynolds 전단응력이라고도하며 물리적으로 단위면적당의 힘을 의미한다.

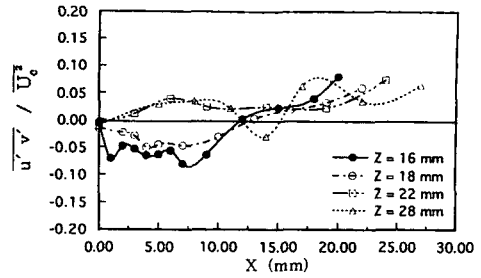


Fig. 8 Distribution of shear stress as function of Y along Z-direction of twin spray

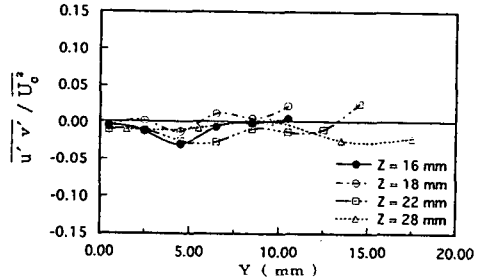
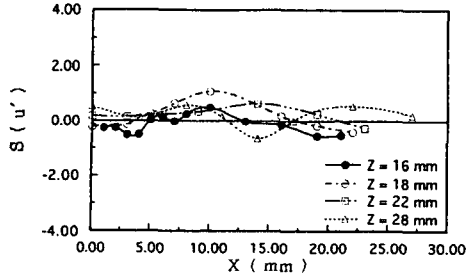
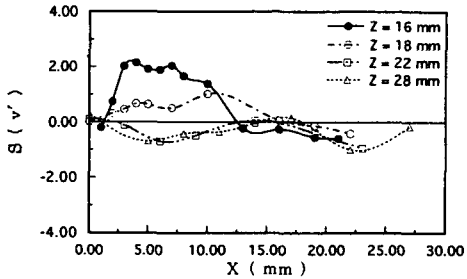


Fig. 9 Distribution of shear stress as function of X along Z-direction of twin spray

Fig. 8, Fig. 9는 각각 이중분무 교차영역에서 Z 방향 변화에 따른 X방향, Y방향으로의 난류전단응력을 $\overline{u'v'}/\bar{U}_c^2=f(X)$, $\overline{u'v'}/\bar{U}_c^2=f(Y)$ 관계로 나타낸 것이다. Fig. 8에서 $X=0$ 에서는 Z의 위치에 관계없이 전단응력은 거의 0의 값에 근접해 있으며 $Z=16, 18$ mm에서는 두 분무 교차영역에서의 충돌에 기인한 반경방향 속도성분의 불균일한 분포로 인해 N2 분무 중심점 $X=10$ mm 부근을 중심으로 부호가 반전되며, $Z=22, 28$ mm에서는 교차지역에서 충돌되지 않은 고유의 운동량을 갖는 다수의 액적들의 유입으로 인해 전 영역에서 양의 값을 보이고 있다. 그리고 $Z=16, 18$ mm에서 $X=0-10$ mm의 절대값이 $Z=22, 28$ mm보다 크게 나타나고 있는데 이것은 두 분무의 교차되기 직전까지는 분무외측부 영향이 존재하기 때문에 불균일한 액적크기와 속도분포, 주위 공기유입 등에 의한 난류특성의 증가에서 기인된다고 할 수 있으며, 역시 분무외곽지역인 $X=20$ mm 이후에서도 큰 전단응력값을 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 9에서는 중심부에서 축방향 위치에 관계없이 거의 0의 전단응력값을 보이지만 외측부로 갈수록 주위 공기유입 등에 의한 액적들의 난동 불안정때문에 절대 전단



(a) Axial component (U)



(b) Radial component (V)

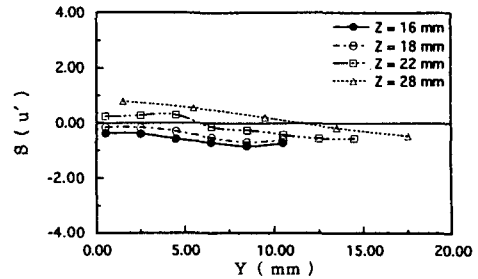
Fig. 10 Distribution of the skewness factor as function of X along Z-direction of twin spray

응력값이 약간씩 증가하고 있다.

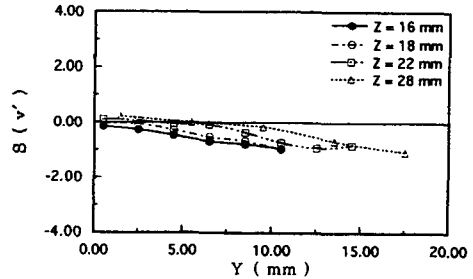
4.4 비대칭도 및 편평도

비대칭도(skewness factor)는 통계학적으로 분석한 난류유동의 중요한 특성치로서 난동의 파동성분이 어느 방향으로 강하게 발생하고 있는가를 나타내 주는 척도이다. 그러므로 대부분의 난류유동에서 비대칭도를 비교, 분석하기 위한 기준으로 Gauss의 확률밀도분포를 이용하는데 이때의 비대칭도는 0의 값을 갖는다. 그러나 난류의 난동속도가 어느 한쪽으로 치우쳐 발생하게 되면 확률밀도분포 역시 그 중심축에 대해 비대칭현상을 나타내게 되어 결과적으로 비대칭되는 그 정도에 따라 임의의 값을 갖게 된다.

Fig. 10은 이중분무의 Y=0에서 Z방향 변화에 대하여 X방향으로의 u', v'의 비대칭도 분포를 도시한 것이다. (a)에서는 거의 전 영역에 걸쳐 u' 비대칭도가 Gauss 분포에 근접한 0의 값을 보이며 (b)의 v'성분의 경우는 충돌직전과 충돌이 강하게 발생하는 Z=16, 18 mm에서 비대칭도가 증가하고 있음을 보여준다. Fig. 11은 이중분무의 X=0에서 Z방향 변화에 대하여 Y방향으로의 u', v'의 비대

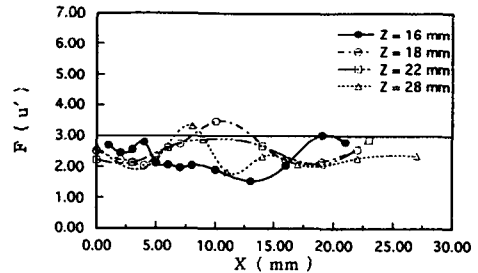


(a) Axial component (U)

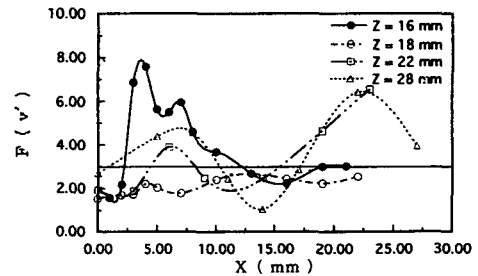


(b) Radial component (V)

Fig. 11 Distribution of the skewness factor as function of Y along Z-direction of twin spray



(a) Axial component (U)



(b) Radial component (V)

Fig. 12 Distribution of the flatness factor as function of X along Z-direction of twin spray

칭도 분포를 도시한 것인데 거의 전 영역에 걸쳐 0의 값으로 분포하고 있음을 알 수 있다.

편평도(flatness factor)는 난류유동에서 비대칭

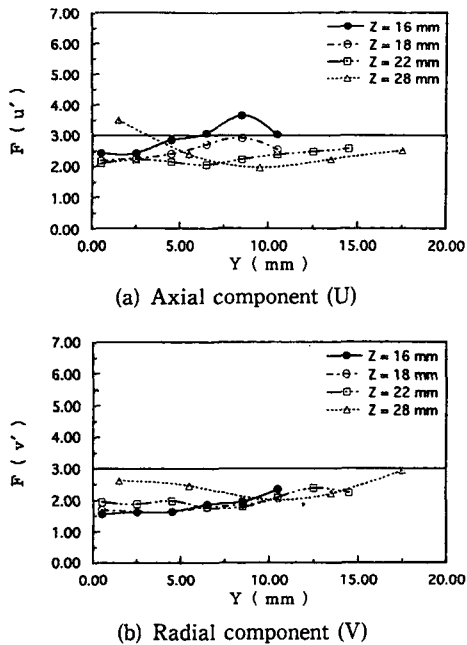


Fig. 13 Distribution of the flatness factor as function of Y along Z -direction of twin spray

도와 같이 통계학적으로 중요한 특성치의 하나로서, 난류유동의 간헐도(intermittency factor)를 분석할 수 있는데 Gauss 정규분포에서는 3의 값을 나타낸다.

Fig. 12는 이중분무의 $Y=0$ 에서 u' , v' 의 편평도를 X 방향에 따라 도시한 것이다. u' , v' 편평도 모두 전 범위에서 불안정한 분포를 보이고 있으며 특히 두 분무 교차가 심한 $Z=16$ mm에서의 편평도는 증가하고 있다. Fig. 13은 이중분무의 $X=0$ 에서 u' , v' 의 편평도를 Y 방향에 따라 도시한 것인데 전 범위에 걸쳐 일정한 분포를 보이고 있다.

5. 결 론

이중분무 교차지역에서의 통계학적 액적유동특성 분석을 시도하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 두 분무 교차지역에서 액적들의 충돌로 인한 방향성 상실로 반경방향으로의 운동량 손실이 크게 발생함을 알 수 있다.
- (2) 두 분무 교차지역에서는 충돌로 인한 불균일한 속도분포로 인해 액적파동성분이 증가하여 간섭 영향이 적은 지역보다 반경방향 성분의 난류강도와

난류전단응력이 증가하는데 반해 축방향 성분의 난류강도는 거의 영향을 받지 않는다.

(3) 두 분무 교차영역에서 반경방향에 따른 u' 비대칭도는 Gauss 분포에 근접한 분포를 보이며, v' 비대칭도는 충돌 직후에 큰 값을 가지나 하류에서는 Gauss 분포에 근접한 분포로 안정됨을 알 수 있다.

(4) 편평도는 두 분무의 교차지역에서의 분포가 전반적으로 불안정하며, 특히 반경방향 성분의 편평도가 축방향 성분에 비해 불안정하다.

본 연구결과로 이중분무의 분무구조에 대해 분무 간섭에 따른 액적충돌의 효과와 주위기체 유입의 영향이 매우 큼을 확인할 수 있었으며 주위기체 유입현상에 대한 정성적, 정량적 규명이 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 1991년도 한국과학재단 기초연구비 지원(과제번호 : 911-0903-033-2)에 의해 수행되었으며, 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

- (1) Okamoto, T., Yagita, M., Watanabe, A. and Kawamura, K., 1985, "Interaction of Twin Turbulent Circular Jet," *Bull. JSME*, Vol. 28, No. 238, pp. 617~622.
- (2) 이상용, 정태식, 한기수, 1986, "응축기체내에서의 두 액체분무간의 유동간섭현상에 대한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제10권, 제3호, pp. 326~334.
- (3) Adams, R. P., 1967, EI. dupont de nemours and company Inc., cited in Crosby, E. J., 1978, "Atomization Consideration in Spray processing," *Proceedings of ICLAS-78*, pp. 435~448.
- (4) Crosby, E. J., 1978, "Atomization Considerations in Spray Processing," *Proceedings of ICLAS-78*, pp. 435~448.
- (5) 김인구, 이상용, 1988, "두개의 와류분무노즐로부터 분사되는 이중분무의 분무특성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제12권, 제2호, pp. 359~372.
- (6) Wu, K. J., Santavicca, D. A. and Bracco, F. V.,

- 1984, "LDV Measurements of Drop Velocity in Diesel-Type Sprays," *AIAA Journal*, Vol. 22, No. 9, pp. 1263~1270.
- (7) Jackson, T. Ja., Nejad, A. S., Obringer, C. A., Switzer, G. L. and Favaloro, S. C., 1988, "The Influence of Particle Size on the Measurement of Turbulence Characteristics in Two-Phase Flows," *Proceedings of ICLAS-88*, pp. 241~248.
- (8) 노병준, 김장권, 1986, "45° 원형 충돌 분류의 통계학적 난류특성 연구," 대한기계학회논문집, 제10권, 제1호, pp. 110~120.
- (9) 김장권, 1987, "등속 45° 원형 상호충돌분류의 통계학적 난류특성에 관한 실험적 연구," 전북대학교 공학박사 학위논문.
- (10) PDA(Particle Dynamic Analyzer) User's Manual.