大韓機械學會論文集 第12卷 第2號, pp. 359~372, 1988.

〈論 文〉

두개의 와류분무 노즐로부터 분사되는 이중분무의 분무특성에 관한 실험적 연구

金 仁 龜*·李 相 龍**

(1987年 11月 16日 接受)

An Experimental Study on the Characteristics of Twin Spray Ejected from Two Swirl Spray Nozzles

In Goo Kim and Sang Yong Lee

Key Words: Spray Interaction(분무간섭), Twin Spray(이중분무), Volumetric Flux(체적유속), Nozzle(노즐)

Abstract

Characteristics of twin spray ejected from two swirl spray nozzles were studied experimentally. By using a patternator for measuring volumetric flux of drop flow at various locations inside the spray, variation of the twin spray pattern along the axial direction was studied with changing the injection pressure and the distance between the nozzles. The general findings from the experiments are as follows: (i) as axial distance from the nozzles increases, the spray pattern in x-z plane which contains both nozzles changes significantly. On the other hand the spray pattern in y-z plane which passes the midpoint between two nozzles remains almost unchanged at outer region as axial distance and injection pressure vary; (ii) at the downstream of the twin spray with spray interaction, the maximum volumetric flux in y-z plane $(q_{max})_y$, has tendency to become larger than that of x-z plane $(q_{max})_x$, due to a characteristic(hollow cone shape) of the constituting swirl sprays, and this trend is pronounced at higher injection pressure since the cross-section of each single spray remains hollw at the longer axial distance from each nozzle with higher injection pressure; (iii) at a certain axial distance from the nozzles, the cross-sectional shape of the boundary of the twin spray tends to be circular similar to that of the single spray with twice the flow-rate, and that distance is not proportional to the distance between two nozzles; (iv) though there are some collisions between droplets from each nozzles of twin spray, in present experimental range, the flow pattern of gas including the entrainment effect plays the key role in spray interaction.

기 호 설 명

a	: 두 노즐간의 거리
d	: 노즐 오리피스의 직경
D	: 액적의 직경
Mcr	: 채집관에 떨어질 수 있는 최소질량
Mt	: 채집시간동안 수집된 전체질량

* 한국과학기술원 기계공학과
** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

n : 액적의 수밀도
p : 분사압력
q : 체적유속
q_0 : 노즐 오리피스에서의 평균체적유속
q_{max} : 축방향에 수직한 단면에서 축방향 거리에 따르는 최대체적유속
$(q_{max})_x$: x-z평면에서 축방향 거리에 따르는 최대체적유속
$(q_{max})_y$: y-z평면에서 축방향 거리에 따르는 최대체적유속
$(q_{max})_s$: 개별분무에서 축방향 거리에 따르는 최대체적유속
$(q_c)_s$: 개별분무의 중심부에서 축방향 거리에 따르는 체적유속
Δq : 이중분무와 두 개별분무의 단순한 중첩간의 체적유속의 차이
Q : 분사유량
r : 반경방향 거리
R : $q=0.5(q_{max})_s$ 되는 반경방향 거리
R_m : $q=(q_{max})_s$ 되는 반경방향 거리
ts : 채집시간
U_r : 주위기체와 액적간의 상대속도
x,y,z : 노즐이 위치한 평면에서 두 노즐의 중점을 원점으로 하는 직각 좌표계
X : $q=0.5(q_{max})_x$ 되는 x방향 거리
Y : $q=0.5(q_{max})_y$ 되는 y방향 거리
λ : 충돌횟수 혹은 충돌 가능성

1. 서 론

압력형 분무노즐(pressure nozzle)은 탈기기 장치나 원자력 발전 플랜트 등에 사용되는 열교환기나 분무 건조장치 등 산업용 분무 시스템에 널리 사용되고 있다. 그 중에서 와류형 분무노즐(swirl spray nozzle)은 점도가 작고 포함된 입자크기가 비교적 작은 분사액체에 다양하게 사용되고 있다. 이 와류형 노즐은 가격이 싸고 유지가 간단하며 교환이 용이한 장점을 가지고 있다. 그러나 압력형 노즐의 특징의 하나인 분사액체의 유량과 분사압력과의 직접적인 관계, 즉 분사유량을 2배로 증가시키려면 분사압력을 약 4배로 증가시켜야 하는 관계와 와류형 노즐의 최적운전조건(optimum operating condition)의 범위가 크지 않으므로 분사액체의 유량에 대한 분무 시스템의 융통성(flexibilitv)은 매우 낮으며 분사압력이 증가하면 노즐 오리피스의 마멸이 심각하게 나타나는 단점을 가지고 있다. 따라서 와류형 분무노즐을 사용하는 일반적인 산업용 분무 시스템에서는 많은 양의 분사액체를 미립화시키고 시스템의 연속적인 운전과 유지를 편리하게 하기 위해서 여러개의 노즐들을 열(列)로 설치하여 동시에 분사하도록 하고 있다. 이렇게 동시에 분사할 경우, 노즐간에 거리가 충분히 크지 않으면 개별적으로 분사된 분무들이 서로 합해져서 하나의 연합된 분무군(群)이 형성된다. 따라서 이 연합된 분무군의 특성을 이해라는 것은 응용의 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다[1].

비교적 제한된 연구가 연합 분무군의 기본 단위인 이중분무(Fig. 1)에 대해서 행하여 졌는데, 이상용 등[2]은 수증기중으로 분사되는 이중분무에 대하여 실험하여 주위기체 유입의 증가와 액적들간의 충돌 가능성에 의한 액적의 크기 및 운동궤적의 변화 등을 정성적으로 살펴 보았다. 그러나 이들의 실험에서는 이중분무에서 중요한 역할을 하는 두 노즐간의 거리[3]와 분사압력을 각각 50mm와 275.7kPa로 고정하였고 노즐 아래에서의 채집위치도 150mm로 고정한 관계로 이중분무의 특성에 있어 노즐간의 거리 및 분사압력의 영향과 분무가 하류로 전개되어가는 현상을 설명할 수 없었다. 본 연구에서는 두 노즐간의 거리와 분사압력을 변화시켜 하류로 전개되는 이중분무의 분무형태를 살펴보았다.

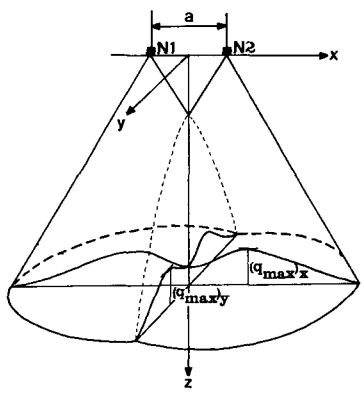


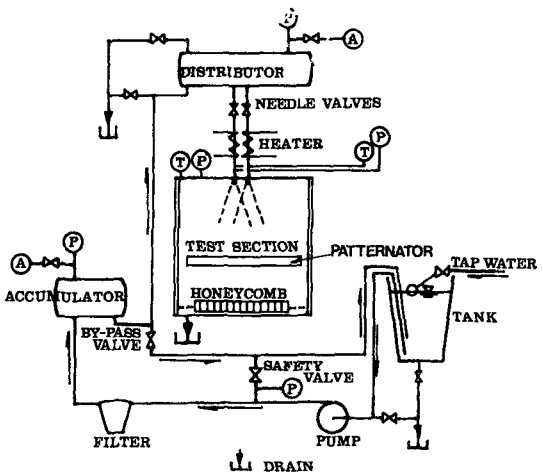
Fig. 1 Schematic diagram of twin spray

2. 실 험

2.1 실험장치

본 연구를 위해 제작된 실험장치의 구성은 Fig

2에 나타나 있다. 한 번의 길이가 60cm인 정육면체 형태의 시험부(test section)는 스테인리스 스틸로 되어 있으며, 양측은 열처리된 유리로 되어 있어서 분무의 형상을 직접 눈으로 관찰할 수 있도록 하였다. 분무액체로는 외부에서 공급되는 상온의 물을 사용하였는 데 실험에서 요구되는 분사압력을 얻기 위해 펌프(2마력)를 설치하여 수조(tank)에 연결하였고, 압력변동을 감소시키고 두 개의 노즐을 동시에 연결하기 위해서 accumulator와 spray water distributor를 설치하였다. 두 종류의 밸브(needle valve와 by-pass valve)와 전열기(2kW)에 의해서 적절한 압력과 온도로 조절된 물은 시험부 상면에 설치된 노즐을 통해서 아래로 분사된다. 노즐에서의 분사압력은 압력계(weksler, GR 5-16-3)로, 분사온도는 열전대 온도계(YEW, type 2575-10)를 사용하여 측정하였다.



A : Air Vent
P : Pressure measurement
T : Temperature measurement

Fig. 2 Schematic diagram of experimenal set-up

2.2 액적수집기구(Patternator)

분사된 액체의 위치별 분무유량을 축방향에 수직한 단면에서 조사하기 위해서 Fig. 3에서와 같은 액적수집기구(patternator)를 제작하였다. 이 기구는 내경 5.6mm, 외경 6.3mm의 스테인리스 스틸 파이프(채집관, sampling tube)들이 각각 10mm간격으로 2열로 배치되어 있는데, 이는 채집관의 크기를 줄여 유동간섭에 의한 채집오차를 가능한한 줄이고, 만족할 수 있는 해상도(resolution)를 얻기위함이다. 또한 채집관 단면에서의 체적유속은 균일하다고 가정하여, 채집유량을 채집시간과 채집관 단면적으로 나누어 체적유속을 구하였다. 정태식[4]은 이렇게 구한 체적유속에 이 체적 유속이 점유하는 면적으로 곱하여 전체 채집면적에서 서로 합하여 구한 유량과 실제 분사유량과의 차이가 1% 이내였다고 보고하고 있으므로 이 방법의 사용에는 무리가 없다고 할 수 있다. 수집된 물은 채집관 끝에 연결된 비닐튜우브를 통해 시험부 바깥에 있는

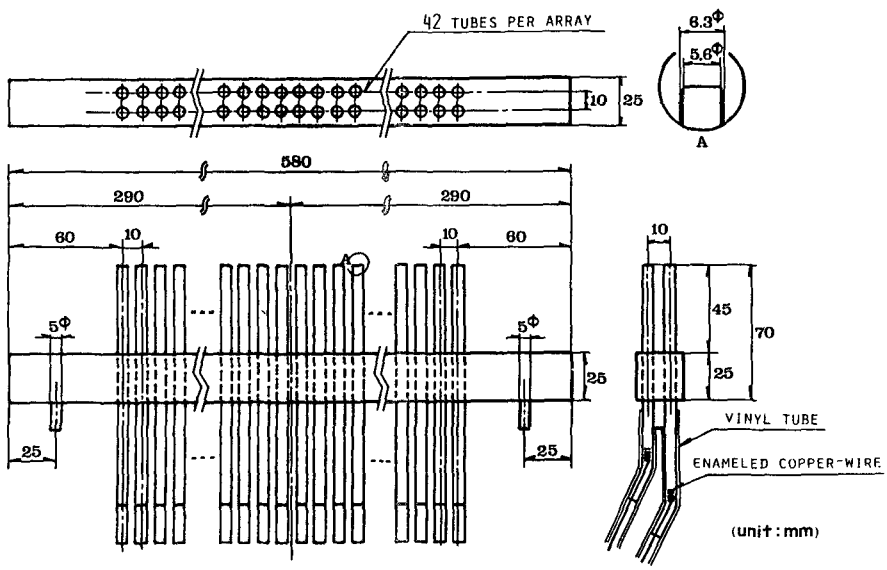


Fig. 3 Detail drawings of the patternator

메스실린더(측정관, measuring tube)로 흘러 들어가도록 되어 있다. 비닐튜우브 내에는 가는 구리선을 삽입하여 튜우브 내의 물의 흐름을 용이하게 하였다.

액적수집기구는 단위 시간당 채집관 단면을 통과하는 액적들의 체적유속(volumetric flux)을 측정하는 기구로 체적유속은 시간평균의 의미를 가진다. 이러한 형태의 액적수집기구는 분무 내의 기체유동에 간섭을 주어 결과적으로 작은 액적들의 운동궤적에 영향을 준다고 알려져 있다. McDonell 등[5]에 의하면 대략 30 마이크론 이하의 액적들은 이 유동간섭에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다. 따라서 액적수집기구를 사용하기 위해서는 세심한 주의와 평가가 요구된다. 본 연구에서 Badzioch[6]가 제시한 방법을 응용하여 수집효율(collection efficiency)을 평가해 본 결과, 평균액적직경이 대략 100마이크론 정도인 실험범위[7]에서는 이러한 기체의 유동간섭에 따르는 오차는 무시할 수 있었다.

본 연구에서 사용한 액적수집기구의 경우에는 위와 같은 오차 이외에 수집된 물이 비닐 튜우브에서 메스실린더로 불연속적으로 떨어지는 현상으로 인한 오차가 추가로 발생할 수 있다. 이러한 측정오차는 전체수집질량, Mt에 대한 임계질량(즉 비닐튜우브에서 메스실린더로 떨어질 수 있는 최소질량), Mcr의 비(比)로써 결정된다. 다시 말해서

$$\text{error}=\frac{Mcr}{Mt}\times 100\% \qquad (1)$$

과 같이 표시할 수 있으며, 채집시간, ts이 길어짐에 따라서 Mt가 증가하게 되고 따라서 측정오차가 줄어든다. 본 연구에서는 다음과 같이 두가지 방법을 사용해서 임계질량을 구하였다. 우선 한가지 방법으로 비닐튜우브 끝에서 방울방울 떨어지는 물방울을 10개씩 채집한 후 정밀한 천칭(±0.5mg)을 사용해서 질량은 구하고 이것을 10으로 나누었다. 다른 방법으로는 떨어지는 물방울을 사진촬영하여 확대된 사진에서 직접 물방울의 부피를 재서 물의 밀도를 곱해주었다. 참고로 이 과정을 설명하면 떨어지는 물방울의 형상이 구(sphere)가 아닌 관계로 축 대칭이라 가정하고 얇은 원판(disk)으로 잘라 이들의 부피를 구하여 합함으로써 물방울의 부피를 구하였다. 사진촬영에서 얻어진 각 물방울들(8번의 실험)이 거의 같은 부피를 가지고 있었으므로 임계질량의 설정이 타당했다는 것을 알 수 있었고, 따라서 두가지 방법으로 구한 부피의 차이도 거의 없었으며 임계질량은 0.122g으로 구해졌다. 각 체적유속에 대해서 채집시간에 따르는 측정오차가 Fig. 4에 나타나있다.

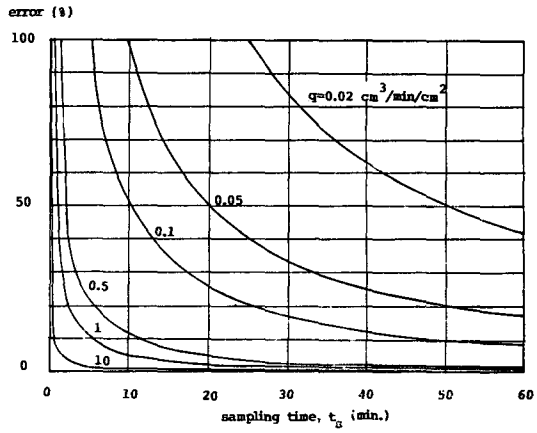


Fig. 4 Percentage error due to discontinuous dripping into a measuring tube as a function of sampling time

본 실험에서 채집시간은 체적유속의 범위와 Fig. 4를 참고하여 60분 내외로 하였으며, 위에서 살펴본 두가지 현상에 의해서 각 체적유속 값에 나타나는 불확실성(uncertainty)은 Table 1에 나타나 있다.

이 액적수집기구는 시험부에 장착된 이송장치에 부착되어 전(全) 분무지역 내에서 체적유속을 측정할 수 있도록 하였다.

2.3 노 즐

노즐은 Spraying System Company에서 제작한 TX-3 와류형 노즐을 10개 구입, 이 중 축 대칭성이 가장 나은 2개를 골라서 $N1$, $N2$라 명명하였다. 이의 제원과 구조는 Table 2와 Fig. 5에 나타

Table 1 Collection uncertainty

Volumetric flux ($cm^3/min/cm^2$)	0.1	0.2	0.5	0.8	1.2	1.6	2.0	2.5
Uncertainty(%)	±10.7	±5.4	±2.1	±1.7	±1.1	±0.8	±0.7	±0.5

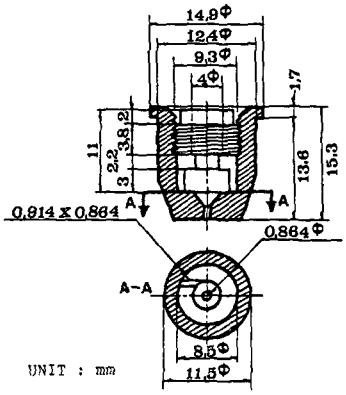


Fig. 5 Detail drawings of the TX-3 nozzle

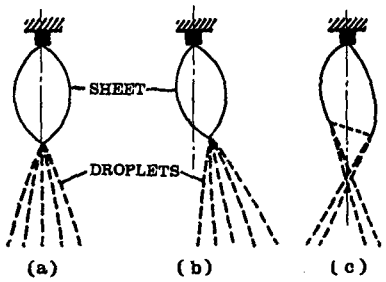


Fig. 6 Axisymmetric and non-axisymmtric water sheets at low injection pressure
(a) Axisymmetric water sheet
(b), (c) Non-axisymmentric water sheets

Table 2 Flow rate from each nozzles

Nozzle / Pressure (kPa)	Flow rate (cm^3/min)	
	$N1$	$N2$
206.8	164.4	173.3
275.7	190.2	196.9
413.7	229.1	234.8
551.6	259.0	268.1

나 있다.

정상적인 분사압력하에서 이 노즐에서 분사된 액체는 일단 속이 빈 원추형의 액체막으로 되며 분무내의 액적의 분포는 이 액체막의 형상에 따라 매우 큰 영향을 받는 것이 관찰되었다. 특히 분사압력이 낮을 경우에 분사된 액체는 표면장력에 의해서 속이 빈 방추형의 액체막(일명 water bell)을 Fig. 6과 같이 형성하며, 이에 의해 분사노즐의 대칭성을 쉽게 판별할 수 있다. 따라서 노즐을 선정할 때 이러한 액체막의 축 대칭성에 가장 중점을 두었다.

2.4 실험조건

실험조건과 측정위치는 Table 3에 나타나 있다. 노즐간의 거리와 축 방향 측정위치는 시험부의 크기를 고려하여 결정하였다. 비록 시험부의 크기가 노즐과 분무의 크기에 비해서 상대적으로 크긴 하지만 분무 내에 있는 기체가 시험부 바닥의 영향으로 약간 옆으로 확산되고 또한 측벽 면의 영향(wall effect)에 의해 분무지역의 하류 외곽에 작은 액적들의 재순환 영역이 존재하였다. 이를 가능한한 없애기 위해서 스크린(screen)과 허니콤(honeycomb)을 사용하였지만 분사압력이 어느정도 이상으로 증가하면(약 400kPa정도) 이러한 현상은 제거되지 않았다. 실제 사용되는 분무 시스템의 경우에 비해 본 실험에서 분무크기에 대한 시험부의 상대적인 크기가 결코 작지 않은 점을 감안해 보면 이러한 재순환 현상은 분무 시스템에서 일반적으로 나타날 것으로 보인다. 측정위치는 이러한 재순환 현상이 심하지 않은 범위에서 가능한한 노즐에서 멀게 하였고 액체막의 분산현상의 영향을 받지 않는 범위에서 가능한한 노즐에 가깝게 하였다. 이러한 측정범위 내에서 등비급수적으로 다시 두 개의 측정위치를 결정하였다. 노즐간의 거리는 분무가 시험부 측벽면의 영향을 받지 않도록 결정하였다.

Table 3 Experimental conditions and sampling positions

Injection conditions	Pressur	206.8,413.7,551.6 kpa
	Temperature	40°C
Ambient air conditions	Pressure	0 kpa
	Temperature	25~27°C
Sampling positions(z)	32,62,105,178 mm	
Distance between nozzles(a)	50,100 mm	

3. 결과 및 고찰

이중분무의 분무특성을 살펴보기 전에 두 액체분무의 개별적인 특성을 살펴보기 위해서 노즐 $N1$과 $N2$에 대해 실험한 결과 $N2$노즐에서 분사되는 분무는 축 대칭의 분포를 가지고 있었으나 $N1$ 노

즐에서 분사되는 분무에서는 유의하여야 할만한 비대칭성이 관찰되었다. 이는 액체막의 형상이 축 대칭이라 하여도 그 두께가 일정하지 않은 관계로 보여진다[8]. 실험결과의 정량적 해석과 이론적인 측면에서 분무의 대칭성이 요구되므로 본 실험에서는 한 측정위치에서 Fig. 7에서와 같이 $N2$ 노즐은 한 방향으로 고정하고 $N1$ 노즐의 방향을 z축에 대해서 60°씩 돌려가면서 체적유속을 모두 세 번 측정하여 평균하였다. 따라서 $N2$ 노즐에서 분사되는 분무의 경우는 같은 위치에서 세 번의 실험이 수행되었다. 여기서 x, y, z축은 Fig. 1에서와 같이 설정하였고 x-z평면은 두 노즐을 포함하는 평면이며, y-z평면은 x-y평면에 수직하며 두 노즐의 중간점을 지나는 평면이다.

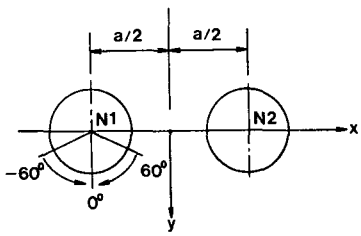


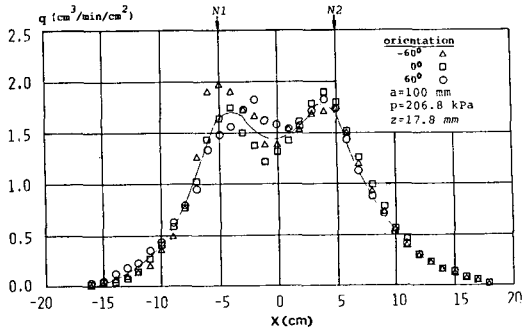
Fig. 7 N1 nozzle orientations

Fig. 8(a), (c)에는 분사압력이 각각 206.8, 551.6 kPa이고 a=100mm, z=178mm에서 수집한 결과가 나타나 있는데 그림에서 볼 수 있듯이 분사압력에 관계없이 x=0에 대해서 비교적 대칭적인 분무 형상을 얻을 수 있었다. Fig. 8(b), (d)에는 동시분무와 두 개별분무의 단순한 중첩과의 차이가 나타나 있는데, 특히 $x \geq 0$인 영역(즉 $N2$ 노즐이 위치한 영역)에서는 $N1$ 노즐의 방향이 변하더라도 차이가 나타나지 않는 것을 보여주고 있으므로 이렇게 평균을 취해서 비대칭성을 보완하는 데는 무리가 없다는 것을 알 수 있다.

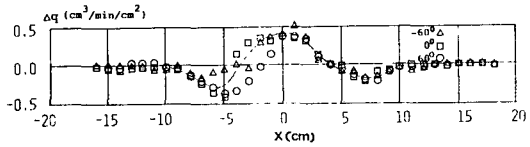
3.1 분무형태(Spray Pattern)

이중분무는 두개의 대칭면(x-z평면과 y-z평면)을 가지며 대부분의 현상이 이 두 대칭면에 포함되어 있다고 볼 수 있으므로 본 실험에서는 이 두 대칭면의 체적유속을 중점적으로 고려하였다.

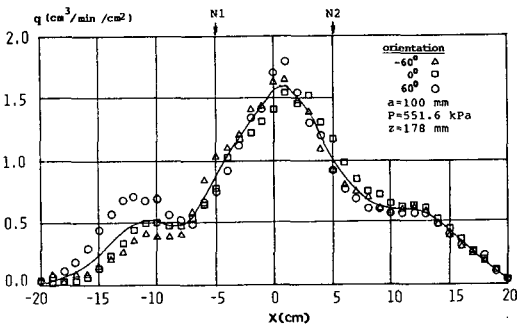
Fig. 9에는 x-z평면에서의 분무형태가 나타나 있다. 그림에서 두 분무가 합쳐져서 결국은 하나의 분무가 되어가는 과정을 볼 수 있는데 노즐로부터의 축방향거리(z/d)에 따라 분무형태가 심하게 변



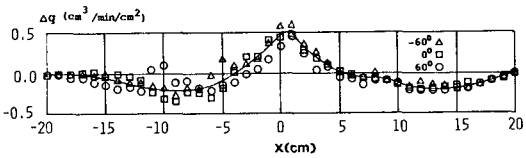
(a) Variations in volumetric flux of twin spray



(b) Variations in volumetric flux's differences between simultaneous injection and simple superposition of two sprays

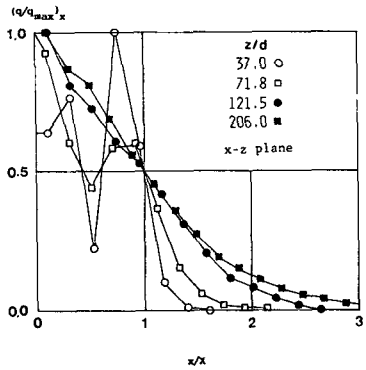


(c) Variations in volumetric flux of twin spray

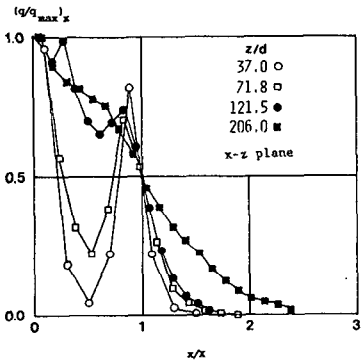


(d) Variations in volumetric flux's differences between simultaneous injection and simple superposition of two sprays

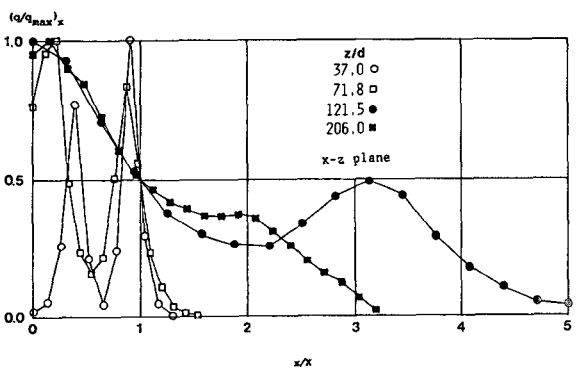
Fig. 8 Variations in volumetric flux and it's differences between simultaneous injection and simple superposition of two sprays according to N1 nozzle orientations



(a) $P=206.8$ kPa, $a/d=57.9$

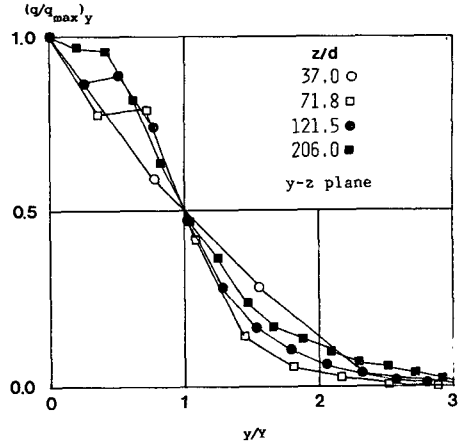


(b) $P=551.6$ kPa, $a/d=57.9$

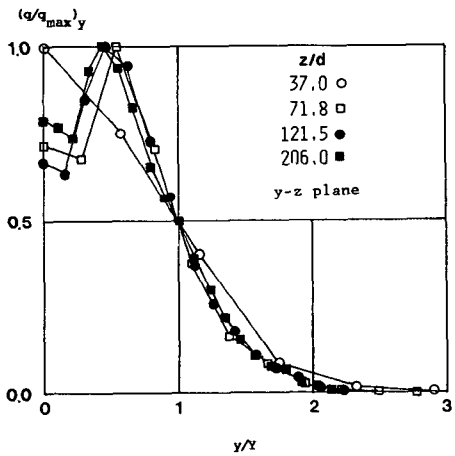


(c) $P=551.6$ kPa, $a/d=115.7$

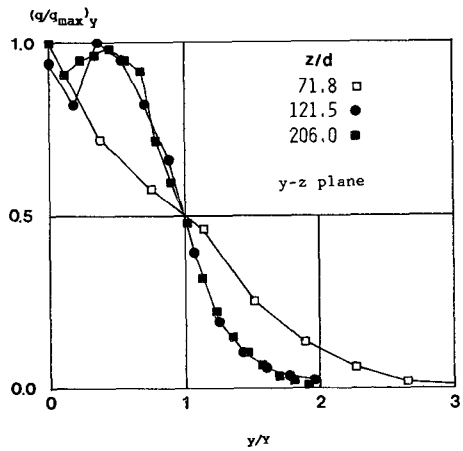
Fig. 9 Patterns of twin spray in x-z plane



(a) $P=206.8$ kPa, $a/d=57.9$



(b) $P=551.6$ kPa, $a/d=57.9$



(c) $P=551.6$ kPa, $a/d=115.7$

Fig. 10 Patterns of twin spary in y-z plane

화하고 있다. 분사압력이 증가하면서 최대 체적유속인 $(q_{max})_x$가 중심선($x/X=0$)에 나타나는 축방향거리는 노즐에 더 가까와지는데, 이는 분사압력이 증가하면 분무각이 커져서 두 개의 분무가 노즐로부터 더 가까운 거리에서 중첩되기 때문이다〔Fig. 9(a), (b)〕. 같은 이유로 노즐간의 거리가 가까와질수록 $(q_{max})_x$가 $x/X=0$에 나타나는 축방향거리는 노즐에 더 가까와 진다〔Fig. 9(b), (c)〕. 노즐간의 거리에 따르는 분무형태의 특징으로 노즐

간의 거리가 멀어지면 분무하류($z/d \geq 121.5$)에서 중심부분에 상대적으로 분포가 집중되어가는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10에는 y-z평면에서의 분무형태가 나타나 있으며 x-z평면에서 분무가 하류로 진행되면서 $(q_{max})_x$가 나타나는 지점이 일률적으로 $x/X=0$로 모였던 것과는 달리 $z/d \geq 121.5$에서는 $(q_{max})_x$ 값이 나타나는 y/Y는 분사압력이나 노즐간의 거리에 따라서 많이 변하고 있다. 분사압력이 206.8 kPa이고 $a/d=57.9$일 때는 z/d에 관계없이 $y/Y=0$에서 $(q_{max})_y$가 나타나는 반면(Fig. 10(a)), 분사압력이 551.6 kPa로 증가하면(Fig. 10(b)) $z/d=37.0$에서는 $y/Y=0$에서 $(q_{max})_y$가 나타나지만 그 이후에서는 대략 $y/Y=1/2$인 곳에서 $(q_{max})_y$가 나타난다. 노즐간의 거리가 멀어지면 대체로 $(q_{max})_y$가 $y/Y=0$인 곳에서 나타나지만 $(q_{max})_y$와 비슷한 크기를 가지는 양이 $y/Y=1/2$인 곳에서도 나타난다(Fig. 10(c)). 이러한 현상은 이중분무를 구성하는 각 와류분무의 분무특성(내부가 빈)과 기체유동의 영향이 혼합되어 나타나기 때문이다.

분무형태 상의 특징으로 x-z평면에서는 분무형태가 z/d에 따라 많은 변화가 있는 반면 y-z평면에서는 $z/a>1$이고 y/Y가 어느 값이상의 영역에서는 분무형태가 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. $z/a>1$인 영역에 해당하는 모든 실험결과를 Fig. 11에 나타내었으며 그림에서 $z/a>1$이고 $y/Y>3/4$이상의 영역에서는 노즐간의 거리나 분사압력이 변하더라도 분무형태는 거의 변하지 않는 것을 알 수 있다.

3.2 $(q_{max})_x$와 $(q_{max})_y$의 변화

Fig. 12에는 축 방향 거리(z/d)에 따른 $(q_{max})_x$와 $(q_{max})_y$의 변화가 나타나 있다. 여기에서 q_0는 노즐 오리피스에서의 평균체적유속으로 다음과 같다.

$$q_0=\frac{Q}{\frac{1}{4}\pi d^2} \tag{2}$$

Fig. 12에는 $N2$ 노즐에서의 $(q_{max})_s$와 $(q_c)_s$가 노즐 축방향 거리에 따라 변하는 것을 함께 나타내었다. $(q_{max})_s$는 대략 $(z/d)^{-2}$의 기울기를 가지며 감소하는데, 이는 와류분무의 형상이 원추형이어서 분무면적은 축방향 거리의 제곱에 비례하며 체적유속은 대략 분무면적의 역(逆)에 비례하기 때문이다. 반면 $(q_c)_s$는 거의 일정한 값을 가지고 있는데,

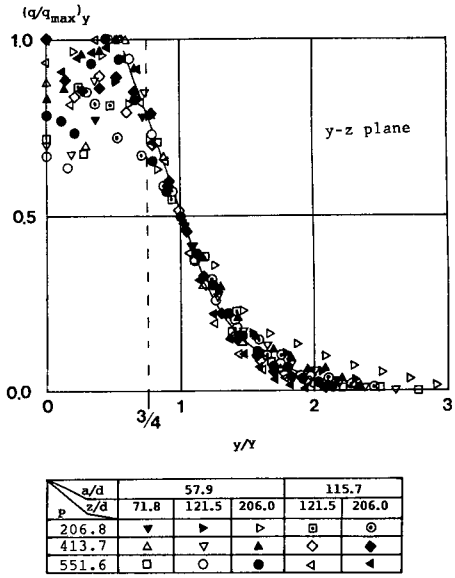


Fig. 11 Patterns of twin spray in y-z plane at whole experimental conditions

이는 분무외각에서 분무 중심부로 액적이 침투(penetration)되는 현상을 지배하는 반경방향(r)의 속도가 분무 중심에서 영(zero)이 되기 때문이며, 또 주위기체의 유입으로 분무 중심까지 침투되는 액적들은 크기가 작아서 체적유속에 기여하는 바가 크지 않기 때문이다[9]. $(q_{max})_s$와 $(q_c)_s$가 만나는 점에서 분무 단면은 내부가 빈(hollow) 형태에서 내부가 차 있는(full) 형태로 변한다고 볼 수 있으므로 초기에는 내부가 비어있던 원추형(hollow cone)분무가 완전히 내부가 찬(full cone)형태의 단면을 가지게 되는 축방향거리는 분사압력이 증가하면서 노즐에서 멀어진다. 이중분무의 경우에 $(q_{max})_x$는 $(q_{max})_s$의 값을 가지다가 분무가 중첩되면 $(q_{max})_x$가 $(q_{max})_s$보다 커진다. 아울러 Fig. 12에서 $(q_{max})_y$의 축방향거리에 따르는 변화를 살펴보면 두 분무가 중첩되면서 급격히 증가한 후 대략 $(q_{max})_x$ 값을 따라간다. 그러나 이중공기제트(twin air jet)에서의 속도분포[10]와 달리 $a/d=57.9$이고 분사압력이 413.7, 551.6 kPa인 경우에는 $(q_{max})_y$가 $(q_{max})_x$ 보다 큰 영역이 존재한다.

이러한 현상은 앞서 언급했듯이 이중분무를 구성하는 각 와류분무의 분무특성(내부가 빈)과 기체유동의 영향이 혼합되어 나타나기 때문이다. Fig. 13에는 내부가 빈 원추형의 분무가 가지는 반경방향에 따른 분무형태(체적유속의 분포)가 나타나 있는

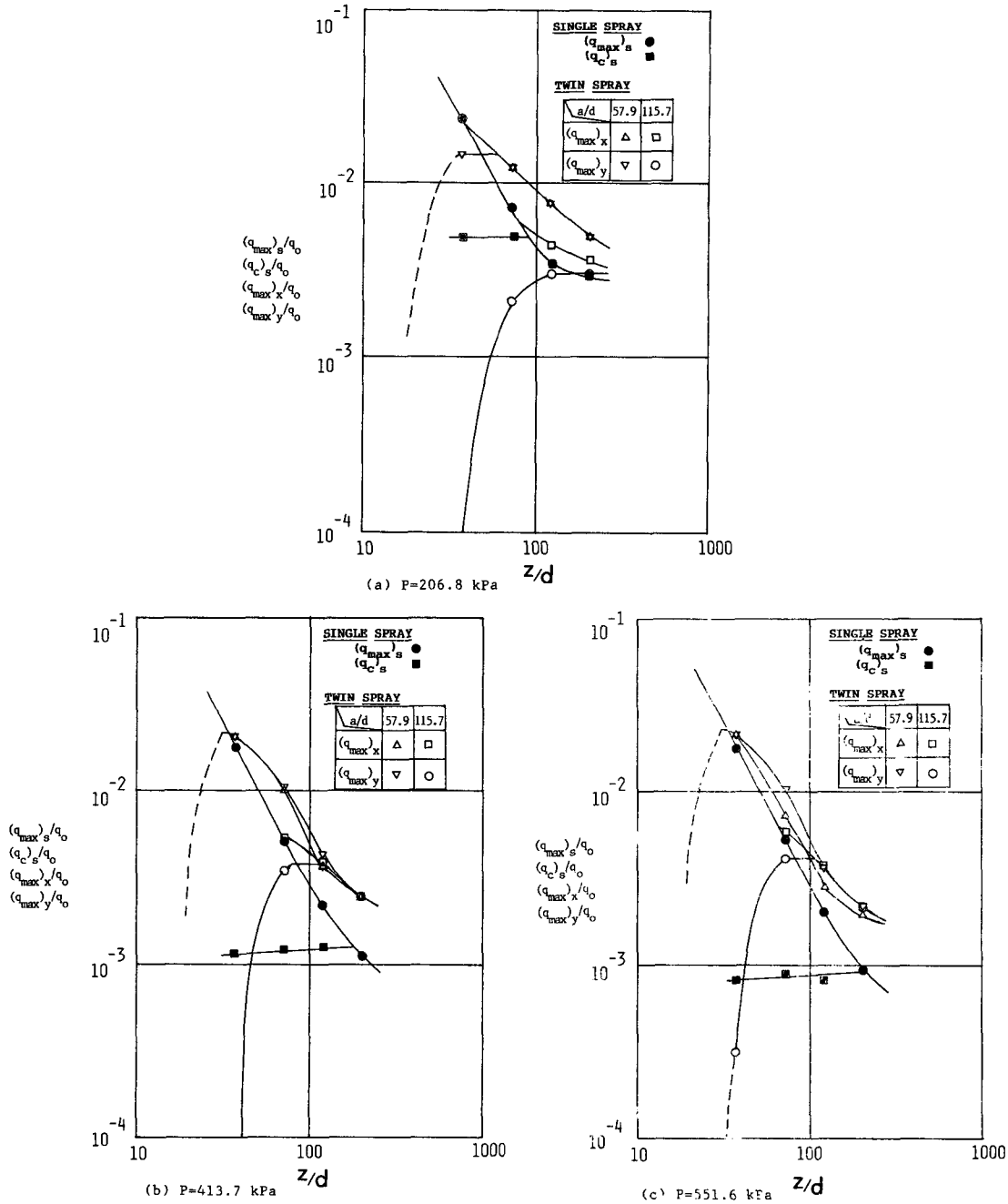


Fig. 12 Variations of maximum volumetric flux in x-z, y-z planes and single spray along z axis. ····: extimated

데 노즐간의 거리 a는 고정되어 있어도 $R_m(z)$와 $R(z)$가 변하기 때문에 다음과 같은 세가지 경우가 생기게 된다.

case 1 : $R(z)/a \leq 1/2$, $q_{max} = (q_{max})_x$

case 2 : $R_m(z)/a < 1/2$ and $R(z)/a > 1/2$,

$$q_{max} = (q_{max})_x = (q_{max})_y \quad (3)$$

case 3 : $R_m(z) \geq 1/2$, $q_{max} = (q_{max})_y$

물론 $r < R_m(z)$에서도 $(q_{max})_s/2$가 되는 r이 있을 수 있으나 이는 분사초기(대략 액체막의 분산(breakup)이 일어나는 부분)에 나타나는 것으로

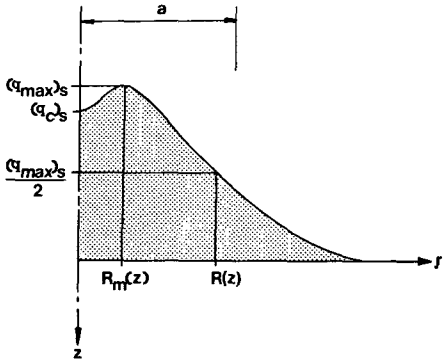


Fig. 13 Typical pattern of a hollow cone spray

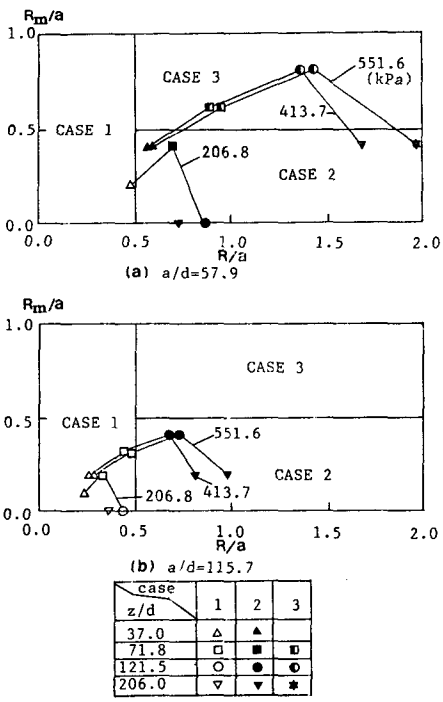


Fig. 14 Regions of each cases in equation (3) and estimated cases at whole experimental conditions based on spray injected from N2 nozzle

분무가 중첩되는 노즐로 부터의 축방향 거리에서 이러한 경우는 거의 발생하지 않기 때문에 생략하였다.

Fig. 14에는 $N2$ 노즐에서 분사되는 분무에서 각 분사압력에 해당하는 $R_m(z)$과 $R(z)$를 구하고 이 결과를 이용하여 각 채집위치에서 나타날 수 있는 경우 즉 식(3)에서 설정한 case 1, 2, 3을 추정한 결과들이 나타나 있다. Fig. 12에서 $(q_{max})_x$와 $(q_{max})_y$의 크기를 비교하여 각 채집위치에서 실제로 나타나는 경우들을 구하고 이를 Fig. 14에서 추정한 경우들과 비교해보면 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이중분무에서 $(q_{max})_y$가 $(q_{max})_x$보다 커지는 현상에는 개별분무의 분무형태가 지배적인 역학을 한다는 것을 알 수 있으나, 노즐간의 거리가 가깝고 분사압력이 551.6 kPa, $z/d=206.0$인 위치에서 추정한 결과는 case 2〔$q_{max}=(q_{max})_x=(q_{max})_y$〕인 반면 실험결과는 case 3〔$q_{max}=(q_{max})_y$〕〔Fig. 14(a)〕인 점을 감안하면 이러한 현상에 기체유동의 영향이 함께 포함되어 있음을 알 수 있다.

3.3 분무경계

Fig. 15에는 x축과 y축에서 $(q/q_{max})=0.1$이 되는 점들이 나타나 있고 이 점들은 대체로 분무의 경계를 표현한다고 볼 수 있다. $a/d=57.9$일 때 x-z평면보다 y-z평면에서 분무경계가 더 빨리 전개(spread)되므로 이중분무의 분무경계는 결국 하나의 원을 이루게 된다. 분사압력이 증가하면 x-z평면이나 y-z평면에서 분무경계의 전개는 더 빨라진다〔Fig. 15(a), (b)〕. 참고로 $a/d=115.7$의 경우〔Fig. 15(c), (d)〕 외삽법(extrapolation)으로 두 경계가 만나는 점을 추정해보면, 분사압력에 관계없이, 노즐간의 거리가 1/2인 Fig. 15(a), (b)의 경우에 비해서 분무경계가 하나의 원이 되는 지점은 약 2.5배로 증가하였다. 이것으로 두 분무가 합쳐져서 분무경계가 하나의 원을 이루는 노즐로 부터의 거리는 노즐간의 거리에 그대로 비례하지는 않는 것을 알 수 있다.

3.4 두 개별분무를 단순히 중첩(Simple Superposition)했을 때와의 비교

Fig. 16에는 두 분무를 동시에 분사했을 때와 이에 상응하는 조건으로 각 개별분무를 단순히 중첩시킨 경우의 체적유속의 차이가 나타나 있다. 그림에서 두 분무가 동시에 분사될 때, 두 분무가 서로 상호작용하고 있다는 것을 알 수 있다. 특히 분사압력이 높을 때 분무가 진행되면서 즉 z/d가 커지면서 $(\Delta q/q_{max})_x$와 $(\Delta q/q_{max})_y$ 값이 커지는 것을 볼 수 있다. 이중분무를 각 개별분무의 단순한 중첩과 비교할 때, 각 평면에서 나타나는 체적유속의 전반적인 변화로 x-z평면에서는 $x/X=0$부근에서 체적유속이 약간 큰 영역이 있고〔$(\Delta q/q_{max})_x>0$〕 x/X가 커지면서 감소하는 경향을 가지며 y-z평면

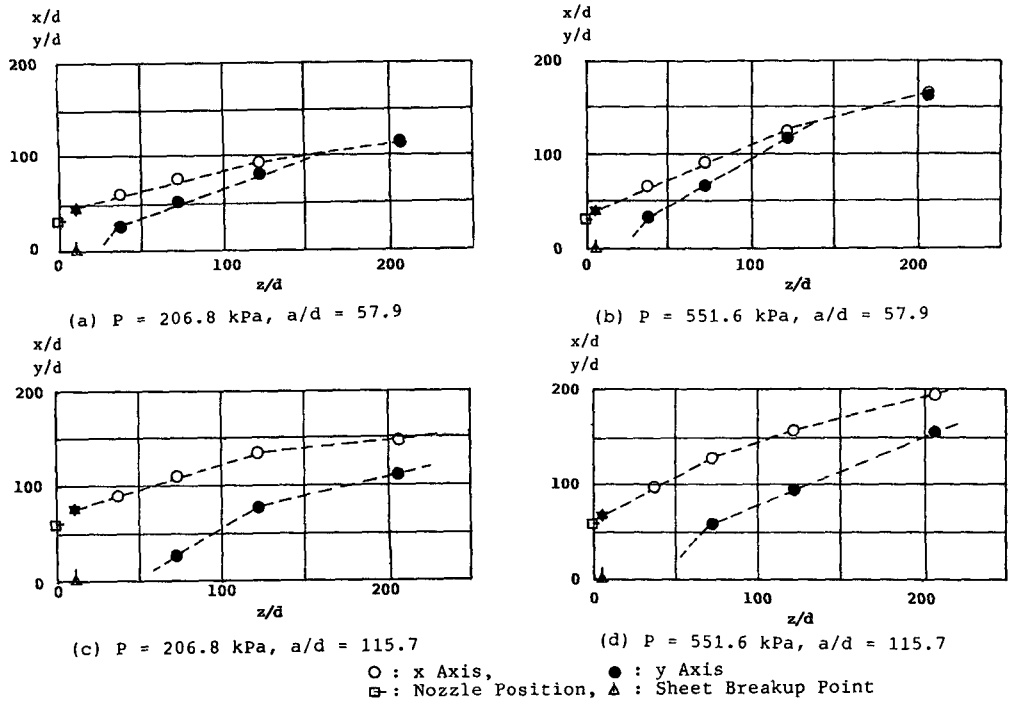


Fig. 15 Points of x and y axis where $q=0.1(q_{max})$

에서는 y/Y에 관계없이 일률적으로 체적유속은 증가한다〔$(\Delta q/q_{max})_y>0$〕. 이러한 $(\Delta q/q_{max})_x$ 및 $(\Delta q/q_{max})_y$ 값은 분사압력과 축방향 거리 그리고 노즐간의 거리 모두의 영향을 받고 있다. 같은 분사조건에서 x-z평면 보다는 y-z 평면에 더 많은 변화가 있고 분사압력이 551.6 kPa이고 $z/d=206.0$의 경우에는 $(\Delta q/q_{max})_y$가 노즐간의 거리에 관계없이 거의 40%나 되는 영역이 존재한다〔Flig. 16(b), (d)〕.

이와 같은 상호작용은 크게 주위기체 유동현상의 변화와 액적들의 충돌현상에 의해 설명되었다[2]. 왜냐하면 체적유속의 변화는 액적의 운동궤적의 변화로 생기는 것이며, 액적의 운동궤적은 기체의 유동양식과 액적간의 충돌현상에 의해서 함께 설명될 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 현상과 관련하여 더 이상의 실험은 하지 않았으나 Fig. 16에 나타난 현상을 참고로 하여 이 두가지 관점의 상호작용을 검토하였다.

액적간의 충돌현상은 액적의 크기, 상대속도 그리고 수밀도의 영향을 받으며[11]

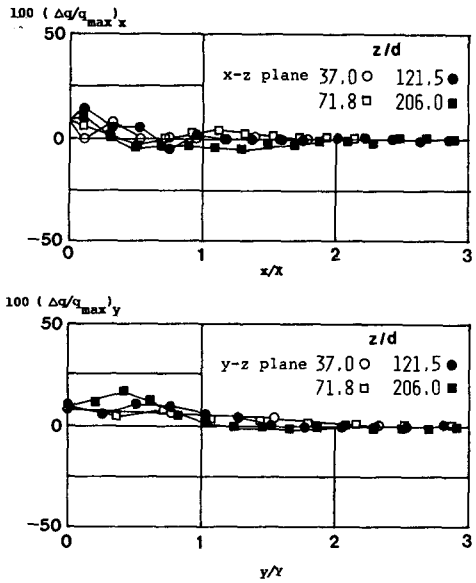
$$\lambda \propto DU_r n^2 \tag{4}$$

로 나타난다. 노즐에서 분사되는 분무에 포함된 액적의 속도는 주위기체의 마찰에 의해 분사초기에 급격히 감소한다[12]. 수밀도는 대략 체적유속인 q에 비례하며 Fig. 12에서 볼 수 있듯이

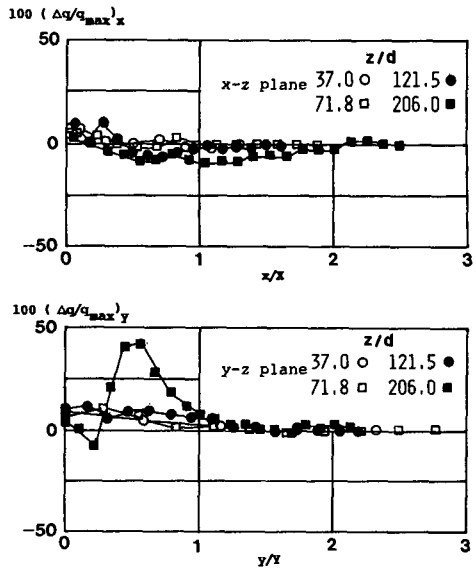
$$n \propto q \propto (q_{max})_s \propto z^{-2} \tag{5}$$

의 관계를 가진다. 수밀도의 경우를 고려할 때 두 노즐간의 거리가 2배로 멀어져 분무가 중첩되는 노즐로부터의 축방향거리가 약 2배 커지면 식(5)에서 n은 1/4로 감소된다. 따라서 충돌횟수(가능성), λ는 식(4)에서 1/6으로 크게 감소한다. 여기에 기체에 의한 액적들의 상대속도의 감소를 고려하면 충돌가능성은 더욱 줄어든다. 따라서 두 분무가 늦게 중첩되면 될수록, 즉 두 노즐간의 거리가 멀어짐에 따라 액적간의 충돌현상은 급격히 감소하게 될 것이다.

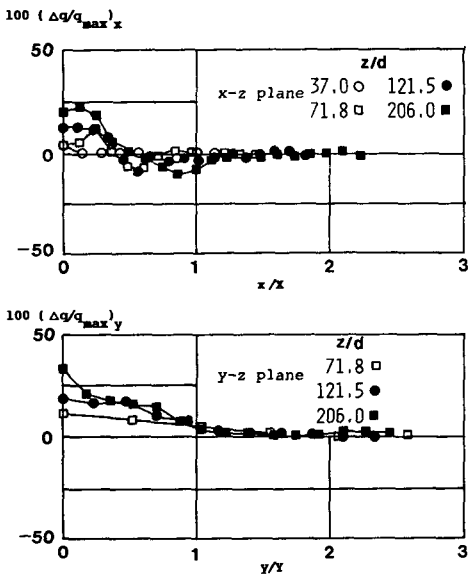
주위기체의 유동변화는 분무외곽에서 주위기체가 유입되는 현상과 분무 내에서의 기체유동형태(flow pattern)로 나눌 수 있다. 주위기체의 유입에 중요한 역할을 하는 것은 분무면적으로[9,13] 두 분무가 중첩되면 이 분무면적의 감소가 있으며 이로 인해서 평균적인 액적의 수밀도는 증가한다. 따라서 기체와 액적간의 운동량 교환이 활발히 진행되어 분무 내에서 기체의 속도는 개별적인 분무보



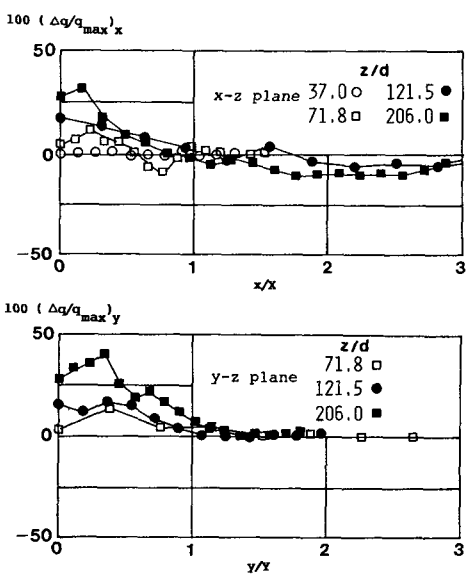
(a) p=206.8 kPa, a/d=57.9



(b) P=551.6 kPa, a/d=57.9



(c) P=206.8 kPa, a/d=115.7



(d) P=551.6 kPa, a/d=115.7

Fig. 16 Differences in volumetric flux between simul taneous injection and simple superposition ot two sprays

다 이중 부문일 경우 더 빨라지게 된다. 반면 분무 내 기체의 축방향 속도와 분무면적의 곱으로 결정되는 기체의 전체 유입량은 분무면적의 감소로 인해서 얼마간 줄어든다. 이것은 전체 유입량이 기체와 액적간의 운동량 교환의 증가에 따라 축방향 기체속도의 증가를 가져오게 되는 간접적인 효과보다는 분무면적의 감소 그 자체에 의해서 더 지배적인 영향을 받기 때문이다[13]. 분무 내 기체유동형태의 변화로 두 노즐간의 거리가 멀어질수록 분무 내 기체유동은 축대칭에서 두 개의 대칭면을 가지는 삼차원 유동으로 바뀌는 현상이 강해지기 때문에 기체의 속도벡터(방향과 크기)는 노즐간의 거리가 멀

어지면 개별분사할 때에 비해 상대적으로 더 많은 변화를 보이게 된다.

노즐간의 거리에 따르는 $(\Delta q/q_{max})_x$ 및 $(\Delta q/q_{max})_y$의 변화를 Fig. 16에서 살펴보면 분사압력이 같을 경우(Fig. 16(a), (c) 또는 Fig. 16(b), (d)) y-z평면에서 그 경향이라든가 크기의 변화는 크게 나타나지 않고 있다. 반면 x-z평면에서는 $a/d=115.7$일 때 오히려 더 큰 차이를 보이고 있어서 상호작용의 효과가 상대적으로 더 커졌다고 볼 수 있다. 따라서 위에 논의된 두가지 관점에서 살펴볼 때 분무간섭현상은 주위기체의 유동변화라는 관점으로 설명하는 것이 더 바람직한 것으로 보여진다. 물론 이상용 등[2]의 실험에서 나타난 바와 같이 분무지역 내에서 부분적인 액적 충돌가능성을 완전히 배제할 수는 없지만, Tate[14]에 의하면 3개와 7개의 분무를 동시에 분사하는 분무군에서 평균액적직경을 살펴본 결과 약간의 변화는 관찰되었지만 대단한 정도는 아니었다고 보고하고 있으므로 실제로 액적간의 충돌현상이 연합된 분무특성에 미치는 영향은 국부적인 것이며, 분무 내의 유량분포의 측면에서는 전반적인 영향을 주지는 않을 것으로 보여진다. 참고로 Adams[15]의 실험에서는 두 분무를 동시에 분사했을 때 중첩지역(본 실험에서 정의된 y-z평면)에서 평균액적직경(SMD)이 약 2배로 증가하였다고 보고하였다. 그런데 여기서 Adams는 분무중첩현상을 국부적인 위치에서 나타나는 평균액적직경(SMD)의 변화만을 가지고 설명하였고, 실제로 동시분사의 경우에는 주위기체의 유입현상의 변화에 의해서도 분무액적의 궤적변화가 생기므로[2], 개별분무 시에 액적을 채집했던 위치와 같은 위치에서 액적을 채집하면 결과적으로 다른 무리(group)의 액적들을 채집하게 되어, 결국 기체유동에 의한 SMD의 변화도 함께 포함하게 된다. 아울러 Adams의 실험에서는 개별분무의 평균액적직경이 59마이크론으로 작아 기체유동이 분무액적의 운동궤적에 상대적으로 많은 영향을 주고, 비교적 노즐로부터 먼 위치(25cm와 50cm)에서 액적을 채집한 결과라는 점들을 종합해 볼 때, Adams의 실험결과를 단순히 충돌현상만으로 설명하기에는 무리가 있다.

결론적으로 본 실험범위에서 두 분무가 중첩되면 국부적으로는 액적간의 충돌이 발생할 수 있으나 전반적으로는 주위기체의 유동변화가 연합된 분무특성에 더 지배적인 영향을 주는 것으로 보여진다. 그러나 노즐간의 거리가 극단적으로 커지면 분무간의 상호작용도 나타나지 않을 것이므로 노즐간의 거리에 따르는 이와 같은 변화는 일단은 증가하다가 감소하는 경향을 보일 것으로 추정해 볼 수 있다.

4. 결 론

액적수집기구(patternator)를 사용하여 이중분무(twin spray)의 분무형태를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) x-z평면에서의 분무형태는 노즐로 부터의 축방향 거리에 따라 많은 변화를 나타냈으나 y-z평면에서는 하류로 내려갈수록($z/a>1$) 분무외곽($y/Y>3/4$)에서는 노즐간의 거리나 분사압력이 변해도 분무형태는 별로 변화하지 않는다.

(2) 와류형 분무노즐에서 분사되는 개별분무의 축방향 수직단면의 분무형태가 내부가 비어있는(hollow) 형태에서 내부가 찬(full) 형태로 바뀌기 위한 축방향 거리는 분사압력이 증가하면서 멀어진다. 이러한 분무특성에 의하여 분사압력이 증가하면 노즐로부터의 거리에 따라 $(q_{max})_y$가 $(q_{max})_x$보다 크게 나타나는 경향이 있다.

(3) 두 개의 분무가 동시에 분사되어 하류로 내려가면 분무경계는 결국 하나의 원을 이룬다. 그러나 두 분무가 합쳐져서 분무경계가 하나의 원을 이루기 위한 노즐로부터의 거리는 노즐간의 거리에 그대로 비례하지는 않는다.

(4) 이중분무를 구성하는 각 개별분무간의 상호작용을 주위기체의 유동변화와 액적간의 충돌현상이라는 두가지 관점으로 검토한 결과, 본 실험범위에서는, 국부적으로 나타나는 액적간의 충돌현상을 배제할 수는 없지만, 주위기체의 유동변화가 분무특성에 더 지배적인 영향을 주는 것으로 보여진다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 1987년도 목적기초연구사업의 일환으로 수행되었으며, 이의 연구비 지원에 관해 재단 관계자들에게 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

(1) Crosby, E.J., 1978, "Atomization Consideration in

Spray Processing", Proceedings of ICLAS-78 pp. 435~448.

(2) 이상용, 정태식, 한기수, 1986, "응축기체내에서의 두 액체분무간의 유동간섭현상에 대한 실험적 고찰", 대한기계학회논문집, 제10권, 제 3 호, pp. 326~334.

(3) Tambour, Y. and Portnoy, D., 1985, "Spray Characteristics of Two Combined Jet Atomizers", Int.J. of Turbo and Jet Engines 2, pp. 263~271.

(4) 정태식, 1985, "여러개의 액체분무간의 유동간섭현상에 관한 실험적 연구", 석사학위논문, KAIST.

(5) McDonell, V.G., Cameron, C.D. and Samuelsen, G. S., 1987, "An Evaluation of Atomizer Symmetry based on Photography, Patternation, Laser Diffraction and Laser Interferometry", ILASS-AMERICAS.

(6) Badzioch, S., 1959, "Collection of Gas-Borne Dust Particles by means of an Aspirated Sampling Nozzle", Brit. J. Appl. Physics, Vol. 10, pp. 26~32.

(7) Fraser, R.P. and Eisenklam. P., 1956, "Liquid Atomisation and the Drop Size of Sprays", Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 34, pp 294~319.

(8) Dombrowski, N. and Wolfsohn, D.L., 1972, "Some Aspects of Spray Formation from Swirl Spray Pressure Nozzles", J. of the Institute of Fuel, pp. 327~331.

(9) Lee, S.Y. and Tankin, R.S., 1984, "Study of Liquid Spray(Water) in a Non-Condensable Environment(Air)", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No. 3, pp. 351~361.

(10) Okamoto, T., Yagita, M., Watanabe, A. and Kawamura, K., 1985, "Interaction of Twin Turbulent Circular Jet", Bulletin of JSME, Vol. 28, No. 238, pp. 617~622.

(11) MacLoughlin, P.F. and Walsh, J.J., 1978, "A Holographic Study of Interacting Liquid Sprays", Proceedings of ICLAS-78, pp. 325~332.

(12) Giffen, E. and Muraszew, A., 1953, "The Atomisation of Liquid Fuels", John Wiley & Sons Inc.

(13) Heskestad, G., Kung, H.C. and Tedtenkopf, N.F., 1981," Air Entrainment into Water Sprays", Factory Mutual Research Corporation Report, Reissue of RC 77-TP-7.

(14) Tate, R.W., 1986, private communication.

(15) 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.