

기액동축 분류의 유동장 및 미립화특성에 관한 연구

전흥신* · 김형택

*경희대 기계공학과, 아주대 에너지학과

Experimental Study on the Flow-field and the Atomization Characteristics of Gas-liquid phase Coaxial Jet

Heung-Shin Jeon* and Hyung-Taek Kim

*Kyung Hee University, Ajou University

요 약

본 연구는 중심부에 액체, 외주부에 산화제가 흐르는 기액 동축분류의 유동장에 대한 것이다. 기액 동축 분사기는 연료의 분사량이 적은 소형 연소시스템용을 고려하여, 실험은 연공비(W/W)가 0.6 이하를 대상으로, 물과 공기를 사용하여 분사조건에 따른 분무특성과 기액 2상 분무류의 기본구조를 조사하여 액적의 확산, 기액혼합특성에 대하여 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 반경방향 기상속도분포 및 액적유속분포는 분구직경 및 분사조건에 관계없이 정규분포에 가까운 형태를 취하고 있으며, 각각 식 (2) 및 (3)으로 나타낼 수 있다. 기상속도 반치폭은 축방향에 따라 일정한 구배(≈ 4.6)로서 증가하며, 기상만의 단상분류의 구배(≈ 6)에 비해서 완만하다. 액적유속 반치폭은 축방향에 따라 더욱 완만한 구배(≈ 3.1)로서 증가한다. 무차원 액적유속분포는 축방향에 따라 일정한 구배($n \approx 1.5$)로서 감소한다. 액적의 확산은 상대적으로 기액유량비가 클수록 효과적이라고는 말할 수 없고, 최대 확산을 이루는 최적의 기액유량비가 존재한다.

Abstract—The study on the flow-field of gas-liquid compound jets has been carried out in this paper. Compound jet is liquid and air flow in central area and circumferential area, respectively. Experiments were performed to investigate spary characteristics, fundamental structure of gas-liquid two phase flow for coaxial injector with W/W, less than 0.6. Gas phase velocity profile and liquid flux profile in the main region is to be Gauss distribution regardless of distance from coaxial injector, is able to represent Eq (2) and (3), respectively. Gas phase velocity profile increases with a certain slope (≈ 4.6) in axial direction, but the slope is smaller than that of one phase gas jet (≈ 6). The slope of liquid phase flux is much smaller (≈ 3.1). Dimensionless liquid flux profile decreases with slope 1.5. Diffusion of droplet is not much affected by high gas-liquid flow rate, but optimal gas-liquid flow rate exists for maximum diffusion.

1. 서 론

항공용 및 로켓트용의 연료 분사노즐, 제트펌프, 이젝터 등 여러분야에 관련되어 있는 축대칭 동축분류는 주로 동일유체의 유동장에 대하여 오래전부터 많은 연구가 수행되어 왔으나^{1,6)}, 중심부에 액체 즉 연료, 외주부에 산화제, 즉 고속의 공기가 흐르는 기액동축분류에 대해서는 주로 연료의 미립화특성 즉 미립화기구, 평균입경 및 입도분포특성에 대한 연구가 수행되어 왔다^{7,10)}.

그러나 항공용 및 로켓트용 연소장치로서 사용되고 있는 기액동축분사기는, 연소실험상과 더불어, 분무의 미립화특성 및 분류의 유동장의 특성, 즉 분무의 확산 및 기액간의 혼합특성이 연소효율 및 연소의 안정성에 직접적으로 중요한 관계를 갖고 있기 때문에 이를 명확히 파악할 필요가 있다. 기액동축분류의 유동장에 대한 연구는 Abramovich¹¹⁾, Hetsroni, G.¹²⁾, Laats¹³⁾ 등의 연구가 보여지고 있으나, 이들은 주로 분류의 유동장에 대한 연구만을 대상으로 수행하였으며, 유동장의 특성과 더불어

어 미립화특성을 함께 수행한 연구는 아직 보여지지 않고 있다.

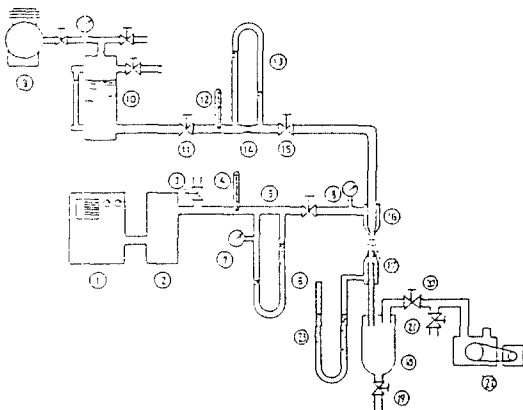
본 연구에서는 연료의 분사량이 적은 소형 연소시스템의 기액 동축 분사기의 분류에 대하여, W/W가 0.6 이하인 dilute spray를 대상으로, 물과 공기를 사용하여 분사조건에 따른 미립화기구, 평균입경, 분무각등의 미립화특성과 기액 2상 분무류의 기본구조, 즉 분무류를 구성하는 기상 속도분포와 액적 유속분포를 실험적으로 조사하여 액적의 확산, 기액혼합특성에 대하여 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

본 연구에 사용한 실험장치의 개략을 Fig. 1에 도시하였다. 기액동축분사기 ⑬에 공급되는 공기는 스크류펌프 ①에 의하여 압축되어, 액큐무레이터(accumulator) ②에 의하여 맥동이 제거된후, 유량측정용 오리피스 ⑤, 유량조절밸브 ⑧를 경유하여, 분사기 ⑬에 도달하게 된다. 물은 컴프레샤 ⑨에 의하여 가압된 물탱크 ⑩에서부터 교축유량계 ⑭, 유량조절 니들밸브 ⑮를 경유하여, 분사기 ⑬에 공급된다.

분사기는 Fig. 2에 도시하였다. 물은 중심부에 위치한 니들구멍에서 분출되고, 이것을 포위하고 있는 외주부에서 공기가 분출되는 기액동축형의 구조로 되어 있다.



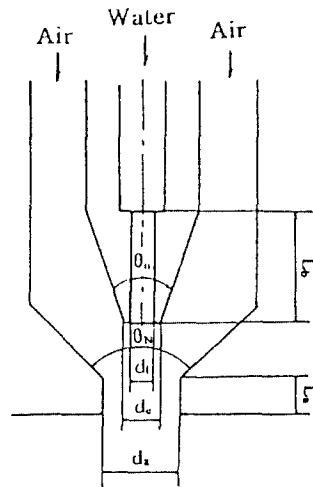
- ① Screw Compressor
- ② Accumuloar
- ③ ⑧ ⑪ ⑮ Needle valve
- ④ ⑫ Thermometer
- ⑤ Orifice
- ⑥ ⑬ ⑲ Manometer
- ⑦ Pressure gage
- ⑨ Compressor
- ⑩ Water Tank
- ⑭ Flowmeter
- ⑯ Injector
- ⑰ Isokinetic probe
- ⑱ Separator
- ⑲ ⑳ ㉑ Needle valve
- ㉒ Vacuum pump

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

본 기액동축분사기는 기액간의 접촉을 분공 내부에서 개시하여, 기액간의 혼합이 촉진되도록 액체를 분출할 니들의 출구는 공기출구 단면보다 내부측에 설계되어 있다. 공기출구 직경은 2 mm, 3 mm로 2가지를 사용하였다.

분무류의 기상속도 분포 및 액적유속분포는 프로브 (probe) ⑰를 이송대로 이동시키면서 측정하였다. 기상속도는 밸브 ⑲, ⑳를 잠그고, 프로브 입구측에 설치된 도입구에서 마노미터 ㉓에 유도된 총압을 근거로 구하였다. 액적유속은 밸브 ㉑의 개도를 조절하여 프로브의 입구에서의 정압이 주위압력과 동일하도록 진공펌프 ㉒로서 분무류를 흡입하여 기액분리기 ⑱에 의하여 액적유량만을 메스실린더로서 측정하였다.

기상속도 및 액적유속 측정프로브는 Fig. 3에 도시하였다. 이것은 Silvestri¹⁴⁾, Ueda¹⁵⁾가 사용한 것과 동일한 형식의 등속흡입 프로브이다.



d_s [mm]	d_c [mm]	d_i [mm]	L_n [mm]	L_c [mm]	θ_n [deg]	θ_c [deg]
2	1	0.6	1	3	40	104
3	1	0.6	1.5	3	40	90

Fig. 2. Coaxial injector.

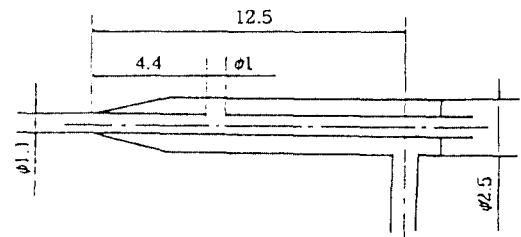


Fig. 3. Isokinetic probe.

2-2. 실험방법

실험은 공기의 분사압력을 0.04 MPa~0.1 MPa로 일정하게 유지시킨후 물의 양을 0.4 g/s~4.0 g/s 범위에서 변화시킬 때의 미립화특성 및 분류 유동장의 특성에 대한 실험을 각각 나누어 수행하였다. 또한 동축형 분사기에 의한 기액 2상 분무류의 기본구조를 단순화시켜 기술할 수 있도록 실험은 기액간에 열 및 물질의 이동을 동반하지 않은 경우, 즉 분사유체로서 실온의 물과 압축공기를 사용하여 대기중으로 분사시킨 정상분무에 대하여 조사하였다.

미립화기구, 분열길이, 분무각은 기액분사기의 출구에서의 분무상태를 일반 및 순간 사진촬영하여 측정하였다. 순간사진은 발광시간 0.7 μsec, 밝기 0.3 Ws의 마이크로플래시를 사용하여 투과광으로 촬영하였다. 분무의 평균입경은 분출구 하류 300 mm 떨어진 위치에서 분무를 샷러로서 실린콘유가 도포된 유리위에 채취하여 만능투영기로서 확대 촬영한 후, 현상한 네가티브 필름을 다시 확대하여 최종적으로 200배 배율로 입경을 측정하여 SMD(Sauter Mean Diameter)로 정리하였다.

기상속도 및 액적유속은 기액동축분류에 있어서 완전 발달영역(주영역)만을 대상으로 측정하였다. 일반적으로 2차원 자유분류의 경우 포텐셜코아의 길이는 분출구의 반경(b₀)의 12배이므로¹⁶⁾ 그 이하의 주 영역을 고려하였다. 따라서 측정위치는 분사기 선단에서 분류 하류방향으로 30 mm, 35 mm, 40 mm, 80 mm, 120 mm 떨어진 위치에서 각각 반경방향으로 0.2 mm~1 mm의 간격으로 측정하였다.

2-3. 기상속도 및 액적유속 보정

분무류의 총압을 프로브로서 측정할 경우에는 프로브내에 포집되는 액적군에 의한 관내의 압력손실이 동반되기 때문에 이 양만큼을 보정하여야 한다. 본 연구에서는 Yatsuyanagi¹⁷⁾가 검정한 결과를 이용하여 각 분사조건에 대한 국소적인 보정량을 구하여 사용하였다.

액적유속은 프로브내의 정압과 주위압이 동일하도록 진공펌프로써 분무를 흡입하여 액적유량만을 메스실린더로 측정하여 평가하였다. 액적유속은 포집량의 총압과 분사유량과의 비율, 즉 프로브에 의한 포집량도 검증할 필요가 있다. 그러나 분무 중심축과 수직인 단면의 모든 곳에서 액적을 포집하는 것은 곤란하기 때문에, 액적유속분포는 분구축에 대하여 대칭이고, 액적의 증발을 무시할 수 있는 경우, 중심축상에서의 액적유속측정치와 액적유속반치폭을 사용하여 구하였다. 본 실험에서 구한 액적유속의 측정지의 일예를 편대수그래프상에서 r'에 대하여 도시하면 Fig. 4에 나타난 바와같이 직선관계가 얻어지기 때문에, 액적유속은 q(x)의 측정점

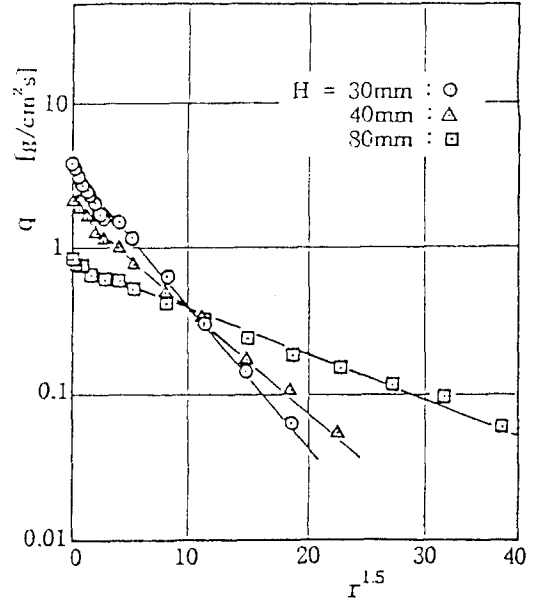


Fig. 4. Liquid flux of radial direction.

을 연결하는 직선과 횡축과의 교점으로서 구할 수 있게 된다. 한편 분무의 외경 R_d(x)에 대해서는 실험에 의하여 구하는 것은 일반적으로 곤란하기 때문에 액적유속 반치폭(r₀)으로부터 예상하였다. 따라서 분출단면에서 거리 x만큼 떨어진 위치에서의 총 액적유량은 다음식으로 구하였다.

$$W_d(x) = \int_0^{R_d(x)} q(x, r) r dr = 2\pi q_d(x) \int_0^{R_d(x)} (1 - \xi_d^{1.5}) r dr \quad (1)$$

여기서 $\xi \equiv r/R_d(x)$

식 (1)에서 구한 포집 총유량 W_d(x)와 물 분사유량과를 비교한 액적포집율 η_{wp}를 구한 일예를 Table 1에 정리하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 기상속도

3-1-1. 기상속도분포

분사기 출구 직경이 2 mm, 3 mm에 있어서 공기 분사압력이 0.06 MPa인 경우 물 분사유량이 각각 0.8 g/s 및 1.6 g/s에 대하여 분출구로부터 거리에 따른 반경방향의 기상 속도분포를 Fig. 5, Fig. 6에 각각 도시하였다. 반경방향 기상 속도분포는 분구 직경의 변화에 관계없이 분무 형태가 기하학적으로 닮은 징류분포에 가까운 형태를 하고 있는 것을 알 수 있다. 이상의 측정지에서 주

Table 1. Liquid Droplets capture rate.

d_s [mm]	H [mm]	q_c [cc/cm ² s]	R_d [cm]	W_{d1} [cc/s]	W_1 [cc/s]	η_{cap}
2	30	6.014	0.567	1.08	1.2	0.900
	40	3.342	0.784	1.15	1.2	0.960
	80	1.215	1.399	1.33	1.2	1.108
3	30	3.979	0.737	1.21	1.2	1.010
	40	2.662	0.894	1.19	1.2	0.990
	80	0.862	1.476	1.05	1.2	0.875

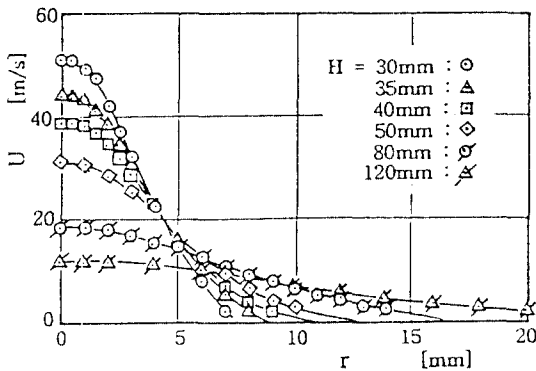


Fig. 5. Gas phase velocity profile ($d_s=2$ mm, $Pa=0.06$ MPa).

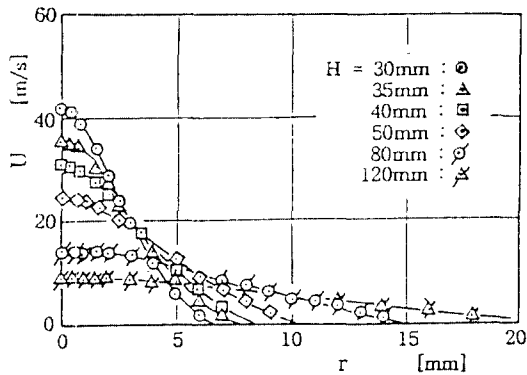


Fig. 6. Gas phase velocity profile ($d_s=3$ mm, $Pa=0.06$ MPa).

영역의 속도구배에 대하여 $u/u_c=0.5$ (u_c : 중심축상 기상속도)가 되는 위치, 즉 기상속도 반치폭(r_c)을 결정하였다.

3-1-2. 기상속도 반치폭에 의한 정리

기상속도 반치폭(r_c)을 사용하여 반경방향의 속도분포를 중심축상 기상속도로서 무차원화하여 정리한 결과를 Fig. 7, Fig. 8에 도시하였다. 그림은 주영역에서의 구배이지만, 분출구로부터 거리 및 분사구의 크기에 관계없이 거의 동일한 형상임을 알 수 있다. 기상속도 분포를

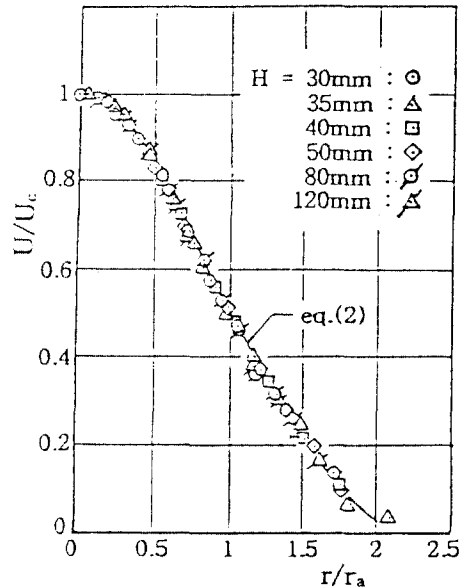


Fig. 7. Dimensionless profile of gas phase velocity ($d_s=2$ mm, $Pa=0.06$ MPa).

식으로 나타내면 Abramovich¹¹⁾가 제안한 다음과 같은 식의 단상분류의 속도분포식에 거의 일치하고 있다.

$$u(x, r)/u_c(x) = (1 - \xi_a^{1.5})^2 \tag{2}$$

여기서 $\xi_a \equiv r/R_a(x) = r/(2.267r_c(x))$

3-1-3. 기상속도의 축방향 변화

기상속도 반치폭의 축방향 변화를 Fig. 9에 도시하였다. 이것은 축방향에 따라서 거의 일정한 기울기(≈ 4.6)로서 증가하는 것을 보이고 있으나, 기상만의 단상분류의 구배(≈ 6)에 비해서는 완만한 것을 알 수 있다. 또한 그림에는 3-2-1항에서 기술할 액적유속 반치폭의 축방향에 따른 변화도 함께 표시하였다. 액적유속의 구배(≈ 3.1)는 더욱 완만한 것을 보이고 있다.

3-2. 액적유속

3-2-1. 액적유속분포

공기의 분출구의 크기가 $\phi 2$ mm인 경우에 공기의 분사압 0.04 MPa(공기유량: 0.74 g/s), 물 공급유량 1.2 g/s 및 공기의 분사압 0.06 MPa(공기유량: 0.97 g/s), 물 분사유량 1.8 g/s인 경우에 대하여 액적 유속분포를 측정 한 결과를 각각 Fig. 10, Fig. 11에 각각 도시하였다. 그림은 분사조건이 변화하여도 액적유속분포는 분출구로부터 측방향 거리에 관계없이, 어느 위치에 있어서나 반경방향으로 거의 정균분포에 가까운 형태를 취하고 있다. 이들의 분포에서 $q/q_c=0.5$ 가 되는 위치, 즉 액적유속 반치폭(r_d)을 결정하였다.

3-2-2. 액적유속 반치폭에 의한 정리

액적유속 반치폭(r_d)을 사용하여 반경방향의 액적유속 분포를 무차원화하여 정리한 결과를 Fig. 12, Fig. 13에

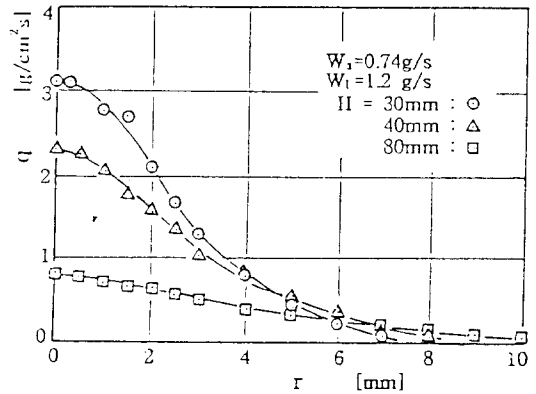


Fig. 10. Liquid flux profile ($P_a=0.06$ MPa, $g=1.2$ g/s).

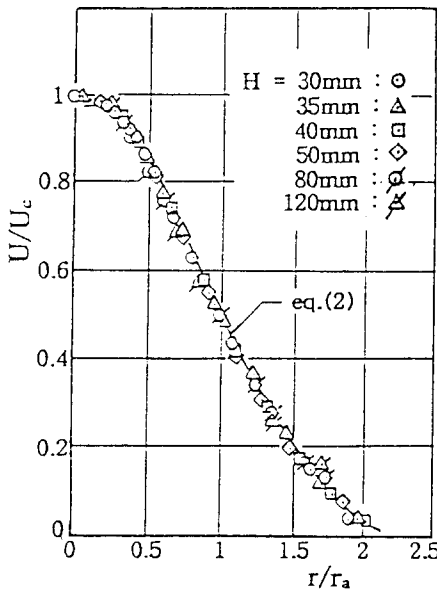


Fig. 8. Dimensionless profile of gas phase velocity ($d_s=3$ mm, $P_a=0.06$ MPa).

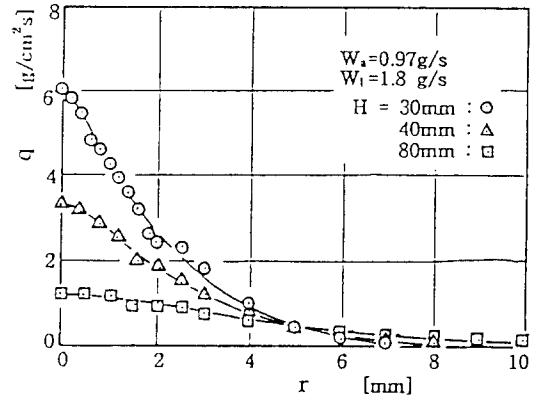


Fig. 11. Liquid flux profile ($P_a=0.06$ MPa, $g=1.8$ g/s).

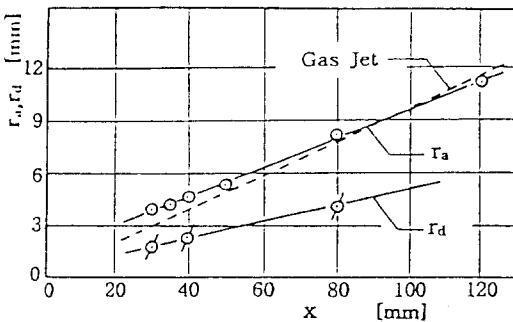


Fig. 9. Half value lines along the axial distance.

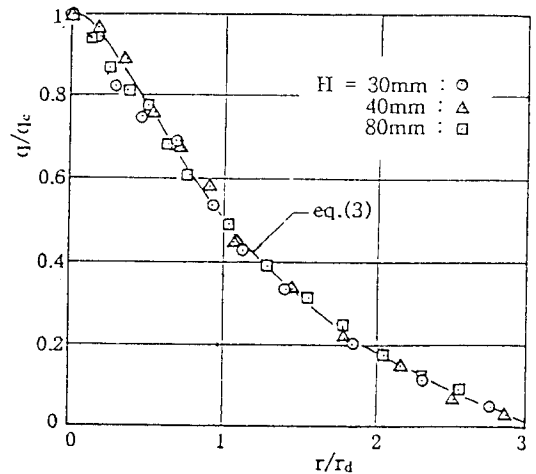


Fig. 12. Dimensionless profile of Liquid Flux ($P_a=0.06$ MPa, $g=1.2$ g/s).

도시하였다. 반경방향에 따른 구배는 분구에서부터의 거리 및 분사조건에 관계없이 거의 일정한 형상을 하고 있는 것을 알 수 있으며, 식 (3)으로 표현할 수 있다. 이 식 (3)은 기액 2상 혼합분류의 액상유속분포식을 제한한 Abramovich⁽¹¹⁾의 식($\xi_d=r/(2.874r_d(x))$)과는 약간의 차이는 보이고 있으나, 이는 Abramovich의 실험범위(W_s/W_a 가 1 이상)와 본 실험범위가 다르기 때문이라고 사료된다. 즉 본 실험의 액적 유속의 반경방향의 구배는 그들의 것보다 확대된 것을 의미하고 있어, 보다 많은 공기량이 액적의 확산에 보다 적극적으로 영향을 끼치는 것으로 사료된다.

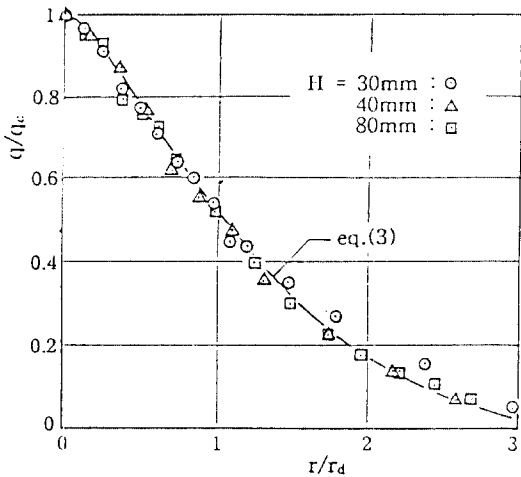


Fig. 13. Dimensionless profile of Liquid Flux (Pa=0.06 MPa, g=1.8 g/s).

$$q(x, r)/q_c(x) = (1 - \xi_d^{1.5})^2 \quad (3)$$

여기서 $\xi_d \equiv r/R_d(x) = r/(3.482r_d(x))$

3-2-3. 액적유속의 축방향 변화

액적유속분포의 축방향 변화는 분구 초기유속(q_0)으로 무차원화하여 Fig. 14에 도시하였다. 그림은 공연비 (W_s/W_a)가 0.54 및 0.58인 경우를 도시한 것으로서, 공연

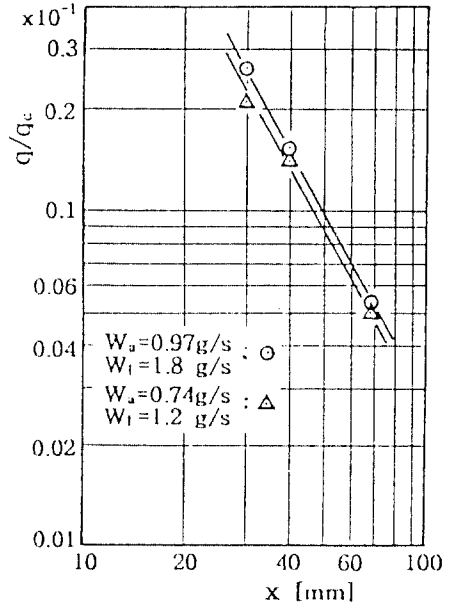


Fig. 14. Dimensionless profile of Liquid flux along the axial distance.

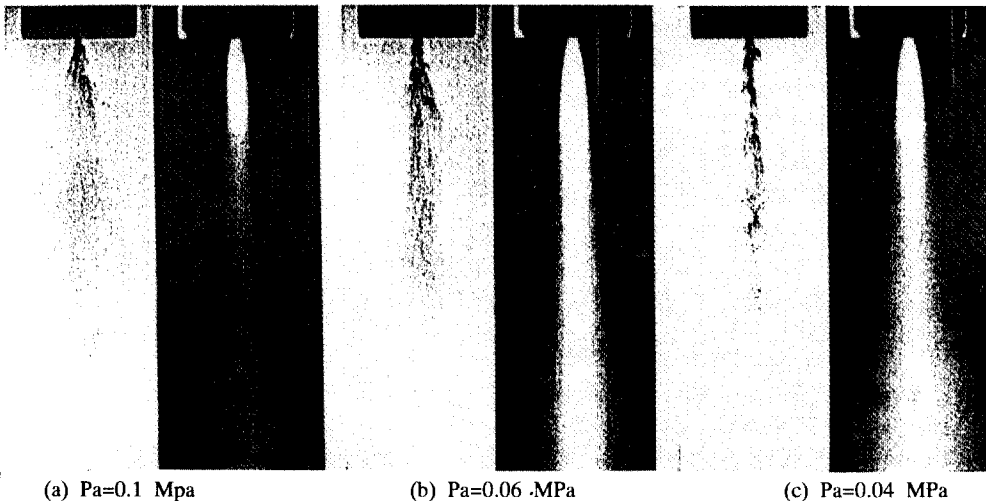


Fig. 15. Atomization phenomena ($W_1=1.2$ g/s).

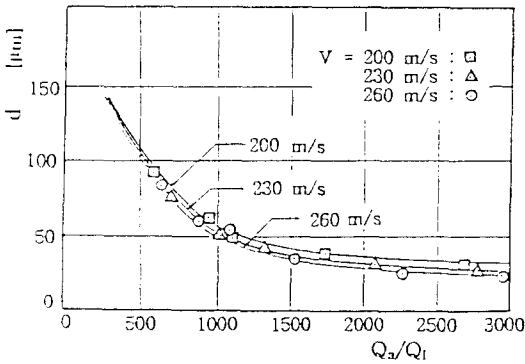


Fig. 16. SMD versus gas-liquid flow rates.

비가 상대적으로 작은 경우에 무차원 액적유속치는 낮은 값을 표시하고 있다. 이것은 공연비가 상대적으로 클수록 액적의 분산에 효과적인 것을 표시하고 있다. 축방향에 대한 감소구배(n)는 $n \approx -1.5$ 이었다.

3.3. 미립화 특성

3-3-1. 미립화기구

연료유량을 일정하게 하고, 기류속도를 변화시켰을 때의 분무의 일반 및 순간사진의 일례를 Fig. 15에 도시하였다. 미립화형태는 밀둥이 굵은 나무 줄기가 뺏어가는 형상을 연상시키고 있다. 이와 같은 미립화 기구는 일명 수지상분열이라 칭하고 있으며¹⁸⁾, Adclberg¹⁹⁾는 이와 같은 원인이 액주표면에 생성된 미소파(ripple waves)가 고속기류에 의해 급속히 성장하여 분열을 일으키기 때문이라고 설명하고 있다.

3-3-2. 평균입경

본 실험범위에서 측정된 평균입경은 Fig. 16에 나타내었다. 그림중의 실선은 기액동축분사기의 평균입경을 실험적으로 구한 Nukiyama-Tanasawa⁷⁾의 실험식 (4)을 기액상대속도(V) 및 기액체적유량비(Q_a/Q_l)로서 도식한 것이다. 그외 식 (4)의 많은 변수는 상온에서의 물의 값을 고려한 것이다. 실험결과는 실험식과 잘 일치하고 있으며, 본 실험범위에서의 평균입경(SMD)은 $22 \mu\text{m} \sim 80 \mu\text{m}$ 이었다.

$$d_{SMD} = 585 \frac{1}{V} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} + 597 \left(\frac{\mu}{\sqrt{\sigma \rho}} \right)^{0.45} (1000 \frac{Q_a}{Q_l})^{1.5} \quad (4)$$

여기서 σ 는 표면장력(dyne/cm), μ 는 점성계수(dyne·s/cm²), ρ 는 밀도(g/cm³), V 는 상대속도(m/s), Q_a, Q_l 은 각각 공기 및 물의 체적유량(cc/s), d_{SMD} 는 SMD(Sauter mean diameter)평균입경(μm)을 의미한다.

3-3-3. 분무각

축대칭 분사기의 분류에 있어서 노즐에서 분사된 고

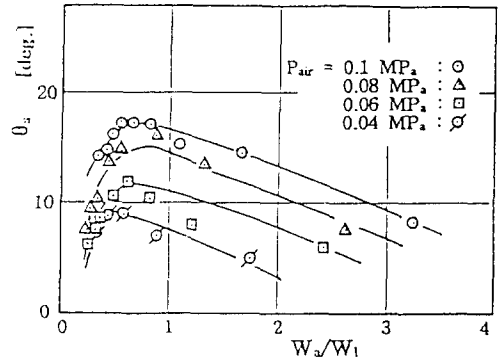


Fig. 17. Spray angle for gas-liquid flow rates.

속공기는 주위 대기중의 공기와 난류혼합을 일으키고, 이때 미세한 입경의 액적은 혼합되는 난류에 의해 확산된다. 분무각은 분출구에서 취한 분무 테두리의 접선이 이루는 각도로 정의하기 때문에 확산과는 밀접한 관계가 있다. 공기의 분사압을 변수로 기액유량비의 변화에 따른 분무각의 변화를 Fig. 17에 도시하였다. 분무각은 동일한 분사압에 있어서는 기액유량비가 크게 됨에 따라 증가하다가, 최대치에 도달한 후에 감소하는 경향을 보이고 있다. 기액유량비가 큰 경우 및 작은 경우에는 각각 동일한 공기유량에 대하여 연료유량이 많고, 적음을 의미하고 있다. 연료유량이 많을 때에는 연료의 평균 입경이 커서 액적의 주위로의 확산이 낮아 분무각이 작게 되고, 반대로 적을 때는 평균입경은 상당히 작게 되나, 이때는 미세액적이 주위로 확산되기 보다도, 오히려 주위기체가 분류중심으로 향하는 엔트레인먼트(entrainment)에 의하여 미세액적이 기류에 실려 분류중심축으로 향하기 때문에 분무각은 작게 된다고 사료된다. 따라서 액체유량이 작을수록 액적의 분산에 효과적인 이라고는 말할 수 없고, 결국 최대 분무각은 어떤 기액유량비에서 존재하게 되는 것을 알 수 있다. 본 실험범위에서 구한 분무각은 $6 \sim 17^\circ$ 의 범위이었다.

4. 결 론

축대칭 기액 동축 분사기의 분류에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 반경방향 기상속도분포 및 액적유속분포는 분구직경 및 분사조건의 변화에 관계없이 분무형태가 일정한 정규분포에 가까운 형태를 취하고 있으며, 각각 식 (2) 및 (3)으로 나타낼 수 있다.

2) 기상속도 반치폭은 축방향에 따라 일정한 구배(≈ 4.6)로서 증가하며, 기상만의 단상분류의 구배(≈ 6)에 비해서 완만하다. 액적유속 반치폭은 축방향에 따라 더

욱 완전한 구배($n=3.1$)로서 증가한다.

3) 무차원 액적유속분포는 축방향에 따라 일정한 구배($n=-1.5$)로서 감소한다.

4) 액적의 확산은 상대적으로 기액유량비가 클수록 효과적이라고는 말할 수 없고, 최대 확산을 이루는 최적의 기액유량비가 존재한다.

참고문헌

1. Corrsin, S.: N.A.C.A. Wartime Report, W-94 (1946).
2. Hinze, J.O. and Zijnen, B.G.: Van der Hegge, J. Appl. Sci, Res. **A1**, 435-461 (1949).
3. Albertson, M.L., Dai, Y.B., Jensen, R.A. and Rouse, H.: J. Fluid Mech., **61**, 805-822 (1950).
4. Forstall, W. and Shapiro, A.H.: Trans. A.S.M.E., J. Appl. Mech., 399-408 (1950).
5. Tani, I. and Kobashi, U.: Proc. 1st Japan Natl. Congr. Appl. Mech., 465-468 (1951).
6. Antonia, R.A. and Bilger, R.W.: Aeronaut. Q., **26**, 69-80 (1974).
7. 拔山 四郎, 棚澤 泰, 日本機論 第 4卷 14號, 128-135 (1938).
8. Mayer, E.: ARS Journal, **31**(12), (1961).
9. Grant, R.P. and Middleman, S.: AICH E. Journal, **12**(4), 669-678 (1966).
10. Burick, R.J.: NASA, CR-120936, 13 (1972).
11. Abramovich, G.N.: The Theory of the Turbulence Jets, MIT Press, 586 (1963).
12. Hetsroni, G. and Sokolov. M.: Trans. ASME, 38-315, Ser.E. (1971).
13. Laats, M.K. and Frishman, F.A.: Fluid Dyn. **5**(2), 333 (1970).
14. Silvestri, M., Advance in Heat Transfer, 355 (1964).
15. 植田辰洋, 波江貞弘, 日本機論, **38**(308), 821-831 (1972).
16. 白堅, 富田, 日本機論 **43**(375), 4186 (1977).
17. 八柳信之, 日本機論, **51**(466), 1857-1866 (1985).
18. 佐藤 豪, 徳岡 直静, 液體の微粒化の基礎と應用, 日本經營開發センター (1981).
19. Adelberg, M., AIAA J., **6-6**, 1143 (1968).