

〈논 문〉

2유체 분무노즐의 분열특성 (I) — 액주분열 및 내부유동 —

김 혁 주* · 이 충 원**
(1996년 9월 2일 접수)

Breakup Characteristics in Plain Jet Air Blast Atomizer (I) — Jet Breakup and Internal Flow —

Hyouck Ju Kim and Choong Won Lee

Key Words : Atomization(미립화), Air Blast Atomizer(2유체 분사노즐), Breakup Length (분열길이), Two Phase Flow(이상류), Breakup Mechanism(분열기구)

Abstract

The breakup length of a liquid jet with flowrate, formed by releasing through a nozzle of circular cross-section into the atmosphere, was experimented and studied for 3 liquid nozzles of varying diameters. The experimental result was analyzed using the existing theoretical equation for predicting the breakup length. It was found that the breakup length of liquid jet depends on the velocity, and the breakup length increases with increasing of the liquid nozzle diameter. Also, the variation range of the breakup length for the same flowrate of liquid increased rapidly as velocity was increased for laminar flow, but in the turbulent flow region, it levelled off in the range of approximately 0.55-0.7 of the mean breakup length. Furthermore, when the longest smooth liquid jet was applied to the co-axial flow air blast atomizer, the effect of air flow on the flow pattern and breakup length was studied for 6 glass nozzles of different lengths and diameters. It was found that depending on the diameter of the mixing tube and liquid jet, it was possible to observe a wide range of flow patterns, such as liquid jet through flow, partial annular flow and annular flow. The liquid jet breakup length was more sensitive to the change in the length rather than the diameter of the mixing tube. As the length of the mixing tube shortens, the breakup length also shortens rapidly.

기 호 설 명

<p>A : 단면적, m²</p> <p>a : 액주반경, mm</p> <p>C : 계수</p> <p>D : 관내경, mm</p> <p>d : 액주직경, mm</p>	<p>k : Bessel 함수</p> <p>k : 파수, $2\pi/\lambda$ wave number</p> <p>l : 길이, mm</p> <p>Lb : 액주분열길이, mm</p> <p>P : 압력, Pa</p> <p>Q : 체적유량, ml/min</p> <p>Re : Reynolds 수, $\rho DU/\mu$</p> <p>T : 절대온도, K</p>
--	--

*회원, 한국에너지기술연구소

**회원, 경북대학교 기계공학과

U : 속도, m/s
 We : Weber 수, $\rho U^2 D / \sigma$
 Z : Ohnesorge 수, $We^{0.5} / Re$

그리스문자

β : 교란성장속도
 δ : 교란진폭
 x : 비열비
 λ : 파장
 μ : 점도, kg/m·s
 ξ : 무차원파수, $ka = 2\pi a / \lambda$
 ρ : 밀도 (kg/m³)
 σ : 표면장력, N/m

상첨자

- : 평균치
 1, 2, 3 : 지수

하첨자

a : 대기상태
 c : 임계치
 g : 기체
 l : 액체
 m : 혼합관
 max : 최대치
 min : 최소치
 osc : 변동치
 0 : 초기상태
 0, 1, 2 : Bessel 함수차수, 계수구분

1. 서 론

액체의 미립화는 산업분야 전반에 걸쳐 널리 이용되고 있는 기술로서, 그 중 2유체 미립화는 분무액체(연료)와 분무매체(공기 또는 증기)의 상대속도 및 질량비를 변화시키므로써 미립화 특성을 쉽게 바꿀 수 있을뿐만 아니라, 분무액체의 물리적 특성이 변화하는 경우에도 사용조건을 만족하는 양호한 분무상태를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다.

노즐에서 분사되는 액주 또는 액막이 작은 입자의 액적으로 변화되는 과정을 살펴보면, 액주와 기류의 상호작용에 의하여 액주가 불안정해지고 불안정성이 점차 커져서 액주는 다시 작은 액사

(ligament)의 형태를 이루며 미세한 액적으로 분열된다. 액체노즐에서 분출되는 액주의 불안정성과 분열기구에 관한 연구는 1878년 Rayleigh⁽¹⁾는 비점성 액체인 경우, 1931년 Weber⁽²⁾는 점성액체인 경우 노즐출구에서 액주에 발생하는 초기교란과 분열과의 관계를 해석적으로 연구하였고, 1969년 Fenn⁽³⁾은 감압한 공기중에서 액주의 거동을 통하여 액주에 미치는 공기저항의 영향을 조사하였으며, 1972년에 Phinney⁽⁴⁾는 최대분열길기와 초기교란의 영향을 설명하였다. 1978년 Kitamura⁽⁵⁾는 액체노즐의 길이 변화에 따른 분열길이의 변화를 조사하였으며, 액체노즐길이가 길어질수록 최대분열길이는 짧아지고, 이것이 발생하는 지점은 액체속도가 낮은 쪽으로 이동하는 것으로 조사되었다. Arai와 Hiroyasu^(6~10)는 디젤기관의 연료분사계통에 적용되는 고속액류의 분열특성을 연구하기 위하여 노즐 직경 및 길이, 액체의 분출속도, 분사실 압력, 액체 및 주위기체의 물리적 성질 등이 분열길이 및 분무각에 미치는 영향을 조사하였다. 1988년 Lee와 Kim^(11, 12)은 단공노즐을 통해 분출되는 평활류액주의 주위에 공급되는 외부 혼합형 동축기류량을 점차 증가시켜 가면서 액주의 안정성과 분열길이 변화를 조사하였다. 1992년 Chigier⁽¹³⁾는 여러형상의 단공 액체노즐에서 분출되는 액주가 외부혼합형 동축기류에 의해서 분열되는 과정을 형상학적으로 분류하고자 하였다. 이와 같이 복잡한 미립화 현상 해석을 위하여 액주의 불안정성과 분열에 관한 연구가 오래 전부터 계속되어 오고 있으나 아직 명확하게 밝혀져 있지 않을뿐만 아니라 내부혼합형 2유체 노즐의 내부유동 및 분열기구에 관한 내용은 그다지 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 단공노즐에서 정지 대기 중에 분출되는 원통형 액주가 액적으로 분열해 가는 과정을 액주의 속도에 따른 분열길이, 분열길이 변동폭을 중심으로 조사하였으며, 층류영역에 있어서 분열길이의 변화를 액주 안정성 해석 이론을 적용하여 검토하였다. 또한 액체 노즐에서 분출된 액주의 분열현상이 노즐내부에서 일어나는 유동양식에 의하여 지배될 것으로 생각되어 액주의 불안정성에 미치는 내부혼합형 동축기류의 영향을 액주의 분열길이 및 유동형태를 중심으로 내부유동과 분열기구를 연관지어 조사하였다.

이를 위하여 본 연구에서는 원형 단면의 액체노즐을 통해 분사되는 액주가 액체의 공급유량, 즉

제트의 속도에 따라 불안정해지는 현상을 관찰하였고, 다른 한편으로 단순한 내부혼합형 2유체 노즐(internal mixing plain jet air blast atomizer)을 유리로 제작하여 가시화 함으로서 이 액주와 같은 방향으로 동시에 공급되는 동축기류의 속도, 노즐의 혼합관 직경 및 길이에 따라 노즐내부에서 일어나는 액주의 변형, 분열과정 및 분열길이의 변화를 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

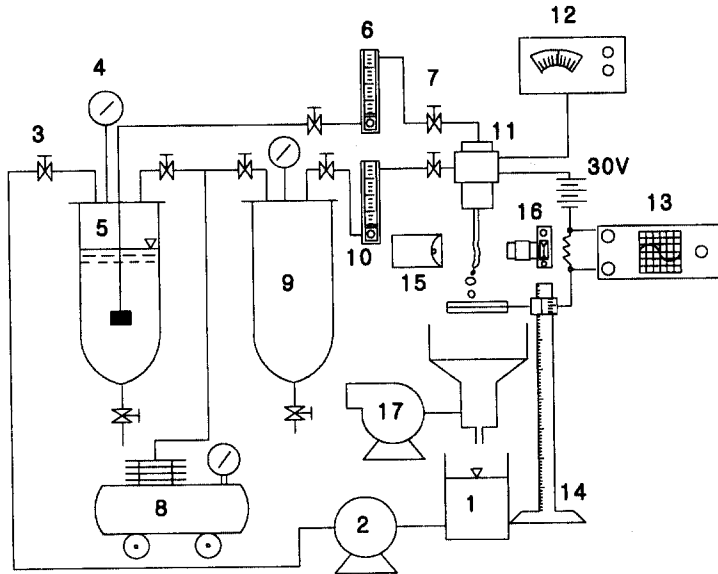
2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 노즐, 액체공급장치, 기체공급장치, 순간사진 촬영장치와 액주분열길이 측정장치로 구성되어 있다. 실험용 액체로는 상온의 수도물을 사용하였으며, 요구되는 분사압력을 얻기 위하여 압축공기를 이용하였다. 공기압축기(8)에 의해 0.9 MPa로 가압된 공기는 건조기(air dryer)에서 수분을 제거한 다음 냉각기(cooler)를 거쳐 정압기

(pressure regulator)에서 0.5 MPa로 감압되어 완충탱크(surge tank)에 일단 저장된 후 실험장치에 공급된다.

물이 채워진 액체탱크(5)는 0.5 MPa의 압축공기로 가압시켰으며, 이는 액체펌프의 사용에 의해서 발생할 수 있는 액체공급시스템의 압력변동으로 인한 액주의 초기교란의 영향을 최소화하고, 액체의 수송 및 분사에너지를 공급할 수 있기 때문이다. 물유량의 측정은 부유식 물유량계(6)를 사용하였고, 유량계 뒤쪽에 설치된 니들밸브(7)에 의해서 조절된 물은 액체공급노즐을 거쳐 노즐(11)을 통해 수직하방으로 대기 중에 분사된다.

미립화용 기체는 0.5 MPa의 완충탱크(9)에 공급된 공기로써, 부유식 공기유량계(10)로써 유량을 측정한다 다음 액체와 함께 노즐을 통해 대기 중에 분사된다. 이때 니들밸브(7)는 기체유량계 다음에 설치하므로써 부유식(float type) 유량계를 통과하는 기체공급압력이 0.5 MPa로서 항상 일정한 압력 하에서 공기유량을 측정할 수 있도록 하여 공기의 압축성으로 인한 계측오차를 줄일 수 있게 하였



- | | | | |
|--------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| 1. water reservoir | 2. pump | 3. air control valve | 4. pressure gauge |
| 5. water tank | 6. water flowmeter | 7. water control valve | 8. air compressor |
| 9. air surge tank | 10. air flowmeter | 11. test nozzle | 12. micromanometer |
| 13. oscilloscope | 14. height gauge | 15. stroboscope | 16. camera |
| 17. suction blower | | | |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Dimensions of liquid nozzles

Liquid nozzle No.	Diameter, D_i (mm)	Length, l_i (mm)
1	0.38	15.5
2	0.68	15.5
3	0.82	15.5
4	0.68	17.5
5	0.68	29.5

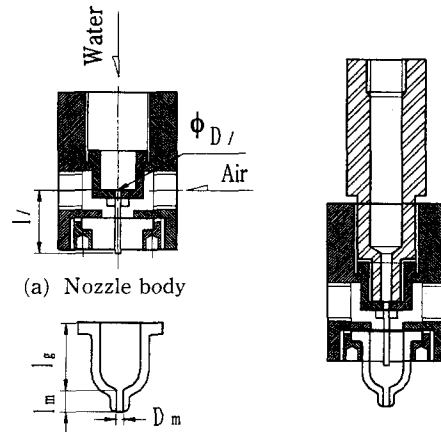
으며, 이때 유량계의 눈금은 습식 가스미터로 상온, 대기압의 유량으로 보정하여 사용하였다. 분사된 분무류 하단에는 흡입장치를 설치하여 분무입자의 비산을 막을 수 있도록 하였으며, 비산되지 않은 액적은 하단에 설치된 수조에 모인 다음 액체공급계통을 통해 액체탱크에 재공급된다.

2.2 분무노즐

본 연구에서는 액주의 불안정성을 파악하기 위하여 Table 1에 나타낸 바와 같이 길이는 같고 직경이 서로 다른 3개(액체 노즐번호 1, 2, 3)의 액체노즐에 대해서 기류가 가해지지 않은 채로 정지대기중에서 액주의 분열길이를 조사하였다.

또한 2유체 분무노즐은 유리로 제작하여 노즐내부의 가시화가 가능하게 하였으며, 노즐 내를 기액 두 유체가 동시에 흐를 때 두 유체가 상호 간섭하므로써 액주가 기류의 운동량에 따라 변형되어 가는 현상 즉 기액 2유체의 내부 유동형태, 액주 분열현상 및 분열길이를 각 노즐 별로 관찰하고자 하는 것이다.

실험에 사용한 유리노즐은 6개로 혼합관의 직경

**Fig. 2** Twin-fluid atomizer**Fig. 2** Twin-fluid atomizer

과 길이 및 공기공급관 길이가 각각 다르게 제작되었으며, Table 2에 나타낸 바와 같다. 이때 사용된 액체노즐은 유리노즐 공기공급관의 길이에 차이가 있기 때문에 직경은 같으나 길이가 다른 2개 (Table 1의 액체노즐 번호 4, 5)를 사용하였다.

Fig. 2 (a)는 노즐몸체이고, (b)는 유리노즐의 형상이다. 노즐 중앙에 위치한 액체노즐에서 액주가 분사되어 유리노즐의 중앙부를 통과하게 되며, 그림에서 보는 바와 같이 유로 면적이 큰 공기공급관에서 액주와 기류가 접촉하여 직경이 급격하게 작아지는 혼합관을 관통하도록 구성되어 있다.

2.3 분열기구의 분석

2유체 분사노즐 내부에 분사된 액주가 기체량의 변화와 노즐형상에 따라서 분열해 가는 과정을 육안, 사진 촬영하여 관찰하였다. 사진촬영은 카메라

Table 2 Dimensions of glass nozzles

Glass nozzle No.	Diameter, D_m (mm)	Mixing tube length, l_m (mm)	Air chamber length, l_g (mm)
1	1.3	1.4	15
2	1.3	3.0	15
3	1.3	20.9	30
4	0.84	6.5	15
5	0.7	19.9	30
6	1.5	20.8	26

(Nikon FE2)에 마이크로렌즈(Nikorr 105 mm)를 부착하여 사용하였으며, 광원은 스트로보스코프(Seorim SL-10, Flash Duration 4 μ s 이내)의 순간 광으로서 지연회로에 연결하여 카메라 셔터와 동기시켜 사용하였다. 사진촬영은 실험실내를 암실로 하여 액주에 초점을 맞춘 다음 카메라의 셔터를 1초~2초 동안 열고, 카메라의 셔터가 열려 있을 때 광원을 발광되게 하여 순간동작 사진을 촬영하였다.

분열길이는 액체분사노즐선단으로부터 분출되는 액주가 단락되지 않고 연속되는 지점까지의 수직거리로 정의하였으며, 횡진동에 의한 액주의 모양은 관계하지 않는다. 이 분열길이 측정장치는 물의 전도성을 이용한 것으로서 Fig. 3과 같이 전기회로로 구성되며, 액주가 접촉하는 쪽에는 전도성 센서로서 금속망(Wire screen)으로 만들어서 액체와 기류가 통과되어 지나갈 수 있고, 액주가 반경방향으로 다소 흔들릴 경우에도 수직거리의 계측이 가능하였다. 전원은 DC 30 V를 사용하며, 직류전원 +쪽에 액체분사노즐을 연결하고, -쪽은 1 M Ω 의 저항을 거쳐 망센서에 연결하였다. 또한 저항의 양단은 오실로스코프(Tektronix 2430 A)에 연결하여 회로상의 전압변동을 관찰하도록 구성한다. 액주에 의해서 분사노즐과 망센서가 폐회로가 구성되면 저항에는 전류가 흐르게 되고 저항의 양단에 전위차가 발생하게 되지만 액주가 절단되어 개회로가 되면 전위차가 0이 된다. 이때 액주에 의해 폐회로가 구성된 경우 오실로스코프 상에 나타나는 전압은 액체분사노즐로부터 망센서까지의 거리인 액주의 위치와 직경에 따라 저항치가 달라지며, 따라서 액주까지의 거리가 멀고 직경이 가늘어질수록 전압이 낮고, 가깝고 두꺼울수록 높게 나타난다. 그러나 액주의 단락여부는 전압신호로부터 명확하게 구분할 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3의 장치를 이용하여 분열길이를 측정할 때, 액주의 측정위치별로 오실로스코프 상에 나타난 시간에 따른 전압신호 변화이다. C는 액주가 거의 연결되어 있는 상태로서 간헐적으로 단락되는 전압신호를 나타내고 있다. 이와 유사한 정도의 주기를 갖는 전압신호가 발생할 때 A로부터 이 지점까지의 거리를 최소분열길이($L_{b_{min}}$)라 하고, 반대로 E는 항상 단락되어 있는 액주의 상태로서 간헐적인 연결을 나타내는 전압신호의 주기가 E신호와 유사할 때 A로부터 이 지점까지의 거

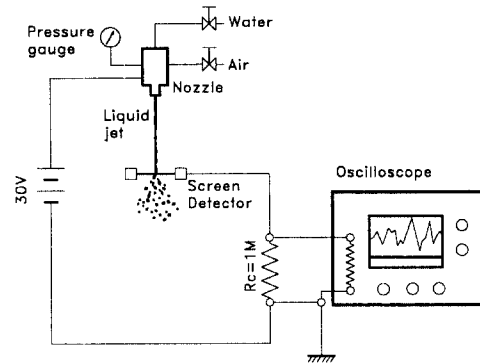


Fig. 3 Electric circuit for measuring of breakup length

리를 최대 분열길이($L_{b_{max}}$)로 정의하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 액주의 위치에 따라서 전압신호가 각각 다르게 나타나며, 액주 분열위치가 시간에 따라 일정하지 않고 크게 변화되고 있음을 쉽게 알 수 있다. 본 연구에서 정의한 분열길이(L_b)는 최소($L_{b_{min}}$)와 최대 분열길이($L_{b_{max}}$)를 계측한 다음 이 값들의 산술 평균치($L_b = (L_{b_{min}} + L_{b_{max}})/2$)로 정의하였다. 이와 같은 방법에 의해서 계측한 분열길이는 측정자에 따라서 다소 달라질 수 있으나 전압신호 주파수 관측이 유사하면 지시치의 $\pm 5\%$ 이내의 재현성을 나타내었다.

2.4 유동인자의 압력측정 및 속도

액체는 액주의 형태로 노즐 중앙에 공급되고, 기체와 동축유동이 되어 노즐 내를 유동한다. 두 유체가 동시에 동일 단면을 통과하기 때문에 서로 각각의 속도에 영향을 미치게 되어 서로 속도가 같아지는 쪽으로 작용한다. 즉 속도가 느린 유체는 가속되고 속도가 빠른 유체는 감속된다. 기체유량이 증가하면 노즐내 혼합실의 압력은 상승하고, 압력의 상승에 따라 기류의 속도는 빨라지게 된다. 따라서 기류의 운동량은 증가하고 액주는 쉽게 변형되어 분열해 나가게 된다.

액체는 비압축성 유체이기 때문에 노즐의 직경과 유량에 의해 속도의 산출이 가능하지만, 기체는 압축성일 뿐만 아니라 작은 단면을 아주 빠른 속도로 유동하기 때문에 노즐내의 속도는 계측이 어렵다. 그래서 혼합실내의 압력 및 밀도를 베르누이 방정식의 단열속도계산식인 식 (1)에 적용하여 기체속도를 계산하였다.

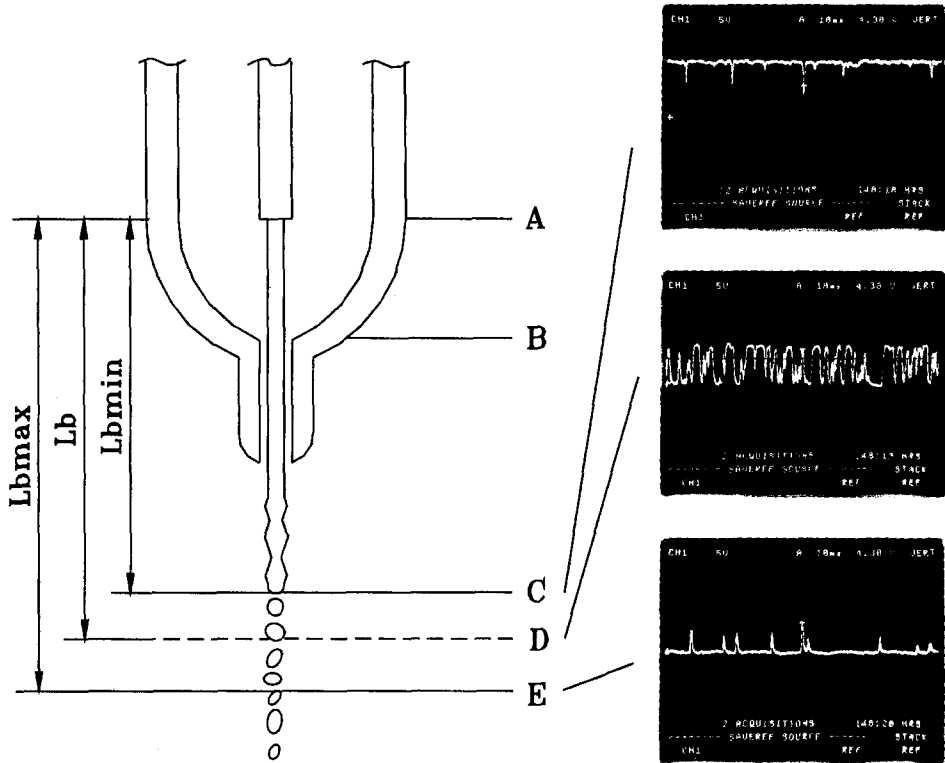


Fig. 4 Voltage variation with time at three typical points of liquid jet

$$U_g = \sqrt{\frac{P_m}{\rho_m} \frac{2x}{x-1} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_m} \right)^{\frac{x-1}{x}} \right]} \quad (1)$$

기체공급압력이 0~0.5 MPa로써 혼합실내의 압력은 기체 및 액체의 유량에 따라 다르기 때문에 낮은 압력에서는 마이크로마노미터(Furness Controls, FCO-14, 0~1000 mmAq)로써 측정하였으며, 높은 압력에서는 0~1MPa 디지털 압력계를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

원형노즐에서 분출되는 액주는 분출 속도에 따라서 분열길이가 달라지는 것으로 보고되어 있으며, 이러한 분열길이를 예측하기 위한 다양한 연구가 수행되어 오고 있다. 본 연구에서는 액주의 형태로 정지 대기 중에 분출되는 액주의 분열길이에 대한 예측과 액주 분열과정에서 발생하는 분열길이의 변화형태를 액체노즐의 형상에 따라 일관성 있게 조사하였다.

동시에 대기중에 분사되는 액주를 보다 효과적으로 미립화시키기 위하여 층류유동하는 액주에 동축의 기류를 가함으로써 두 유체가 통과하는 노즐의 직경, 길이 등 형상에 따라 변화되는 노즐내의 유동형태를 가시화하여 정성적으로 분석하고, 기류의 속도에 의해 변화되는 노즐 형상별 액주의 분열길이를 정량적으로 분석한 결과를 고찰하고자 한다.

3.1 액체 분출속도가 분열길이에 미치는 영향

원형 분출구를 통해서 대기압력의 분위기 중에 $D_t=0.68 \text{ mm}$, $l_t=15.5 \text{ mm}$ 의 액체노즐에서 분사되는 경우의 액주 분열길이의 측정 예를 Fig. 5에 나타낸다. 액주의 분출속도에 따른 분열길이의 최소치(L_{bmin}), 평균치(L_b), 최대치(L_{bmax})의 변화 및 분열길이의 변동폭($L_{bosc}=L_{bmax}-L_{bmin}$)의 변화를 나타내었으며, 이때의 분사압력을 함께 표시하였다. 본 연구는 분사압력을 이용한 액체분무 방식이 아니고 기류에 의한 2유체 미립화 방식에 관한 것이기 때문에 액체의 분출속도 범위를 $U_t=20 \text{ m/}$

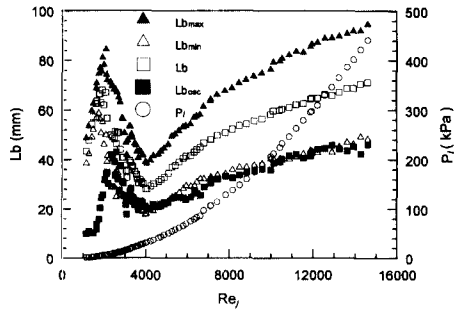


Fig. 5 Various breakup length and pressure of the liquid jet ($D_t=0.68$ mm)

sec 이하로서 비교적 낮게 유지하였다.

분열길이의 최소, 최대 및 평균치는 분출속도의 증가에 따라 상사되는 형태의 변화를 나타내고 있으며, 액주의 레이놀즈수가 $Re_t=2 \times 10^3$ 근처에 이를 때까지는 선형적으로 증가하며, 이 영역을 층류 영역이라 한다. $Re_t=2 \times 10^3$ 을 넘어 $Re_t=4 \times 10^3$ 에 이르는 영역에서는 액주의 분열길이는 점차 감소할 뿐만아니라 길이의 순간 변화가 심한 천이영역에 해당한다. $Re_t=4 \times 10^3$ 이상은 난류영역으로서 액체의 분출속도가 증가함에 따라 분열길이는 증가하는 것으로 나타나고 있다. 또한 Arai와 Hiroyasu 등⁽⁶⁾에 의하면 액주의 분출속도를 더욱 증가시키면 $U_t=65$ m/sec 부근까지 분열길이는 완만하게 증가하다가 그 후 분열길이가 다시 감소하게 되는데, 이 변곡점이 난류영역에서 분무영역(spray region)으로 바뀌는 또 하나의 천이점이라고 보고한 바 있다.

한편 액체 레이놀즈수 증가에 따른 액주의 분열길이 변동치(Lb_{osc})는 역시 분열길이의 변화곡선과 유사한 경향을 나타내며, 분열길이가 길수록 변동폭도 커지는 것을 알 수 있다. 이때 액체유량의 증가에 따른 노즐내의 압력은 Fig.5에서 보는 바와 같이 Re_t 의 제곱에 비례하는 모양으로 나타나며, 이는 액주의 속도가 $\sqrt{\Delta P_t}$ 에 비례하는 형태로 증가하는 경향임을 의미한다.

3.2 액체 노즐 직경이 분열길이에 미치는 영향

Fig.6은 길이가 $l_t=15.5$ mm로 서로 같고, 직경이 $D_t=0.38, 0.68, 0.82$ mm인 3개의 액체노즐만을 사용하여 기류를 가하지 않은 채로 정지대기 중에 액체를 분사하였을 경우에 레이놀즈수에 따른

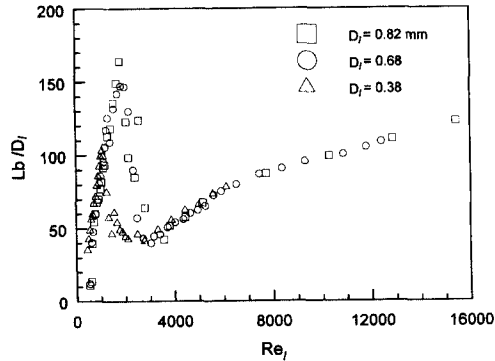


Fig. 6 Effect of D_t on the breakup length

무차원 분열길이의 변화를 액체 노즐 직경별로 측정할 결과이다. 액체 레이놀즈수의 증가에 따라서 분열길이는 직선적으로 증가하다가 최대치를 나타낸 다음 불규칙하게 흔들리면서 감소하여 최소치를 나타낸 다음 다시 안정적인 증가를 시작하게 되는 동일한 경향을 갖는다. 액주 분열길이 변화는 각 노즐의 층류 유동 영역에서는 거의 동일 선상을 따라 변화되지만, 무차원 분열길이의 최대치는 노즐 직경이 가장 작은 $D_t=0.38$ 의 경우는 나머지 두 노즐에 비해 작은 레이놀즈수에서 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 난류영역이 시작되는 지점은 액체노즐의 직경에 무관하게 $Re_t=3000$ 으로 나타났으며, 이 지점 이후의 무차원 분열길이 변화는 거의 동일 선상을 따라 증가되는 것으로 나타나고 있다.

또한 실험조건 내에서 직경이 서로 다른 3종의 노즐에 있어서, 분열길이 변화곡선의 변곡점이 발생하는 지점은 D_t 에 무관하게 특정 액체 속도에서 일어나는 것을 알 수 있었으며, 분출속도 약 $U_t=2.6$ m/sec 근처에서 분열길이 최대치가 존재하고, 분출속도 $U_t=4.5$ m/sec 근처에서 최소치가 나타나는 것으로 조사되었다.

이처럼 액체노즐의 직경이 작은 경우에 분열길이의 최대치가 짧게 나타나는 것은 액주와 노즐벽면과의 작용에 의한 마찰저항이 상대적으로 커져서 액주의 불안정을 촉진하므로써 일어나는 현상으로 생각되며, 따라서 이러한 현상은 액주의 운동량이 비교적 적은 층류 및 천이영역에서 현저하게 나타난다. 또한 이러한 이유에 의해서 액체 노즐이 작을수록 동일 압력에 대한 최대 액체 분출유량도 작

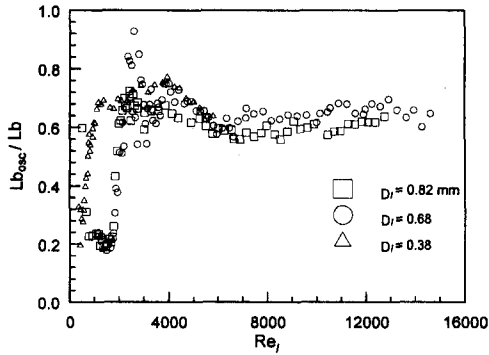


Fig. 7 Oscillating range of the breakup length of liquid jet

아지는 것으로 나타났다.

3.3 액주분열길이의 변동

노즐에서 분출되는 액주의 길이는 동일 유량에서도 시간에 따라 변화를 일으키는 것으로 보고되고 있으나 이에 대해서 상세하게 검토한 경우는 거의 없다. 실제로 액주가 액적으로 변화되어가는 과정에서 액적생성 위치가 액주의 말단하류에서만 발생한다고 할 수 없으며, 말단에서 발생하는 경우에도 액적의 생성과정에서 액주의 신장과 수축의 반복에 의해 시간에 따른 분열길이가 불규칙하게 변화된다.

Fig. 7은 액주분열길이의 최대치(Lb_{max})와 최소치(Lb_{min})로부터 계산한 분열길이의 변동폭을 액주 평균 분열길이로 무차원화하여 액체 레이놀즈수의 변화에 따라 노즐별로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 액주분열길이 변동폭은 $D_i = 0.68, 0.82$ mm인 노즐에서는 $Re_j = 2.3 \times 10^3$ 까지의 층류영역에서는 아주 급격하게 증가하는 경향을 보이며, 분열길이가 최대치가 되는 Re_c 지점보다 다소 큰 레이놀즈수에서 $D_i = 0.68$ mm인 경우에는 95%이르는 등 변동폭이 최대가 됨을 알 수 있다. 그러나 $D_i = 0.38$ mm인 노즐에서는 액주분열길이 변동폭이 증가하기 시작하는 지점의 레이놀즈 수가 더욱 작게 나타나고 변동폭이 최대가 되는 지점도 천이류에서 난류로 변화되는 지점이다. 이러한 현상은 역시 액주에 작용하는 마찰력에 의한 것으로 생각되며, 직경이 작은 경우에 더욱 빨리 불안정해지는 것을 알 수 있다. 분열길이 변동폭은 층류에서는 급격하게 증가하여 천이영역에서는 불규칙한 변화를 보이며, $Re_j = 6000$ 의 초기 난류영역까지는

다소 감소하는 경향을 보이다가 발달된 난류영역에서는 액주의 분열길이의 약 55~70% 범위로 일정해짐을 알 수 있다.

3.4 액주분열길이의 예측

2유체 분사노즐에 있어 분열현상을 규명하는 것은 공학적으로 매우 중요하며, 많은 연구자들에 의해서 행해졌다. 액주의 분열기구에 관한 연구를 살펴보면 Rayleigh⁽¹⁾는 정지대기중에 분사된 액주의 불안정성에 대한 선형이론을 제시하였다. 그러나 주위 유체의 흐름, 점성, 질량전달 등의 영향을 무시하였다. Weber⁽²⁾는 Rayleigh의 해석을 확장하여 점성의 영향을 고려하였으며, 노즐출구에서 생성된 초기교란이 시간에 따라 지수 함수적으로 성장하여 교란의 진폭이 액주의 반경과 같아질 때 분열이 일어난다고 하는 모델을 제시하였다. Weber의 안정성 이론에 의해 얻어진 액주의 특성방정식은 무차원 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\beta^2 + \beta(6Z\xi^2) = (1 - \xi^2)\xi^2 + C_1 \frac{We\xi^3 k_0(\xi)}{2k_1(\xi)} \quad (2)$$

식 (2)에서 얻어진 최대성장속도를 이용하여 분열길이를 구할 수 있다.

Grant와 Middleman⁽¹⁴⁾은 Lb/d_0 와 물성치의 변화에 따른 분열길이의 실험치를 이용하여 식 (2)를 수정하였으며, $\ln(a/\delta_0)$ 을 Ohnesorge수의 함수로 보는 것에 의해 분열길이의 예측을 시도하였다. 또한 Sterling와 Sleicher⁽¹⁵⁾는 속도분포의 완화(relaxation of the velocity profile)가 없을 때 Weber의 이론은 공기역학적 효과를 과대 평가하게 된다고 주장하였으며, 완화계수 C_1 이 0.175일 때 실험치와 잘 일치함을 보였다. Lin 등^(16~18)은 공간적으로 성장하는 교란에 대한 액주의 안정성 해석에서 얻어진 단일식을 이용하여 제트의 분열영역을 설명하였다.

한편 Mahoney와 Sterling⁽¹⁹⁾은 제트내에서 속도 분포의 완화를 고려하여 Weber의 이론을 수정하였으며, 층류제트의 길이에 대한 일반식을 얻어내었다. 이 식은 제한된 조건이긴 하지만 실험결과와 잘 일치하며 다음과 같다.

$$\frac{Lb}{d} = \frac{We^{1/2}(1+3Z)}{f(Z, We_s)} \ln(a/\delta_0) \quad (3)$$

식 (3)에서 초기교란의 크기 $\ln(a/\delta_0)$ 는 진동이 나 노즐의 거칠기 등과 같은 실험조건에 영향을 받

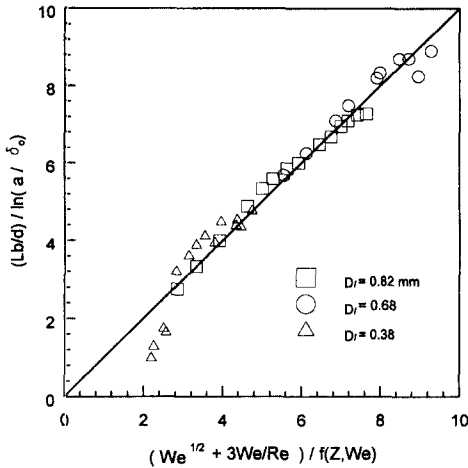


Fig. 8 Comparison of measured jet length to jet length predicted from Eq. (3)

기 때문에 액체나 시간 등의 변화에 따라 달라진다. 따라서 공기역학적인 효과를 무시할 수 있는 저속영역에서의 실험결과로부터 결정되어야 한다.

Fig. 8은 본 실험에 사용된 세 가지 액체노즐로부터 얻은 결과와 식 (3)에 의해 구한 분열길이를 비교한 것이다. $\ln(a/\delta_0)$ 값은 각 노즐마다 난류영역의 결과로부터 평균치를 구하여 사용하였다. Mahoney와 Sterling⁽¹⁹⁾의 실험범위와 다르지만 식 (3)으로부터 계산된 값은 실험값과 잘 일치됨을 알 수 있다.

3.5 동축기류에 의한 액주 분열 현상

Fig. 9는 Table 2에 나타난 6개의 유리 노즐을 대상으로 직경 $D_t=0.68$ mm의 액체노즐을 통해 유량 $Q_t=45$ ml/min인 평활류 액주의 형태로 노즐 중앙에 수직하방으로 분출시킴과 동시에 공기량을 점차적으로 증가시켜가며 정지대기중에 분사시켰을 때, 노즐내부를 가시화하여 액주 변형과 혼합유체의 유동형태 및 분열과정을 순간 촬영한 사진이다.

공기가 공급되지 않는 상태($Q_g=0$)에서 액주 직경(d)과 유리노즐의 혼합관 직경(D_m)은 혼합관내에서 액체의 유동형태를 결정하는 주요 인자가 된다. $d \ll D_m$ 인 경우에는 액주는 평활류의 형태로 혼합관을 관통하여 유동하지만, $d \geq D_m$ 인 경우이거나 d 보다 D_m 이 약간 큰 경우에는 액주는 혼합관 내벽과 상호 간섭하여 부분 부착되거나 액체가 충만되어 중력을 받아 아래로 유동하게 되기 때문에 평활류 액주는 변형되게 된다. 이와 같은 현상은 Fig.

9의 (e)와 나머지 다른 경우를 비교하므로써 명확하게 알 수 있다. 직경 $D_t=0.68$ mm의 액체노즐에서 분출되는 액주는 Fig. 9의 (e)의 노즐 5를 제외한 전 노즐에 걸쳐 공기유량 $Q_g=340$ ml/min로서 저유량 영역에서는 노즐을 관통하여 노즐의부까지 액주의 형태를 유지하고 있다. (e)의 경우에는 혼합관 직경이 액주 직경보다 약간 크지만 액체가 충만되어 흐르는 것을 알 수 있다.

공기 유량이 증가하게 되면 액주와 기류의 상대속도가 점차 커짐에 따라서 기류가 액주를 불안정하게 함으로서 평활류 액주형태를 유지할 수 없다. 외부혼합식 2유체 분사노즐의 액주분열과정은 공기유량이 적은 경우에는 액주표면에 축방향으로 좌우대칭의 사인파가 형성되는 종진동에 의한 분열과정을 거쳐, 공기유량이 많아지면 액주는 기류의 영향을 더욱 크게 받아 좌우로 움직이는 횡진동의 형태로 변화되어 액주분열길이가 짧아지고, 공기유량이 더욱 증가하면 양호한 미립화가 이루어지게 된다.

내부혼합식 2유체 분사노즐에 있어서 관통하는 평활류 액주의 변형과정은 외부 혼합식의 경우와 크게 다르지 않지만 혼합관에 의해서 액주가 횡진동에 따라 반경방향으로 퍼져나가려는 것을 제한당하게 되므로써 혼합관의 길이에 따라 액주의 유동형태가 크게 달라지게 된다. 또한 기체유량이 증가함에 따라서 분열위치가 상류쪽으로 이동하여 분열 길이는 점차 짧아지게 되며, 이때 기체유량 증가에 따른 각 노즐별 분열길이 감소 경향은 유사하지만, 공기유량 즉 기액유량비에 따른 액주 유동형상은 노즐형태 즉 혼합관의 직경과 길이에 크게 좌우된다.

Fig. 9의 사진 (a), (b), (c)는 Table 2의 노즐 1, 2, 3으로써 직경 $D_m=1.3$ mm의 동일 직경을 갖고, 기체공급관 길이(l_g)와 혼합관 길이(l_m)가 서로 다른 노즐에 대한 것으로서 혼합관 길이에 따른 액주 분열현상을 비교하고자 하였다. 노즐의 길이가 가장 짧은 (a)의 경우에는 액주가 완전히 분열되어 미립화되는 경우에도 전혀 벽면에 부착되지 않는다. 또한 (b)의 경우에는 액주가 기류의 작용에 발생하는 횡진동 발생위치가 상류쪽으로 충분히 이동하게 되면 벽면에 충돌하는 경향을 보인다. 그러나 (c)의 경우에는 혼합관의 길이가 충분히 길어서 작은 공기량에서도 노즐벽면에 액주가 부착되어 액막을 형성하게 된다. 혼합관 길이가 길수록 적은

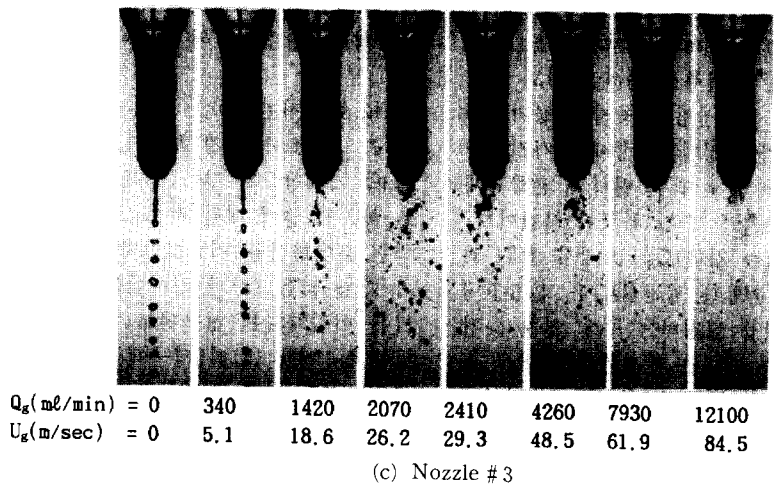
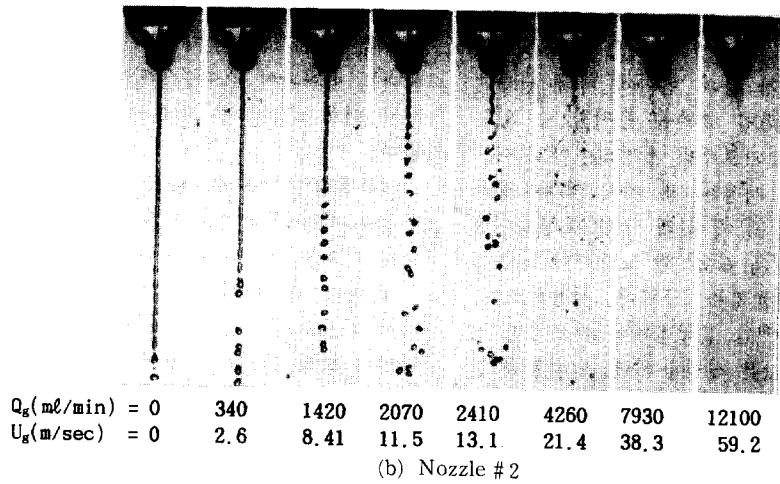
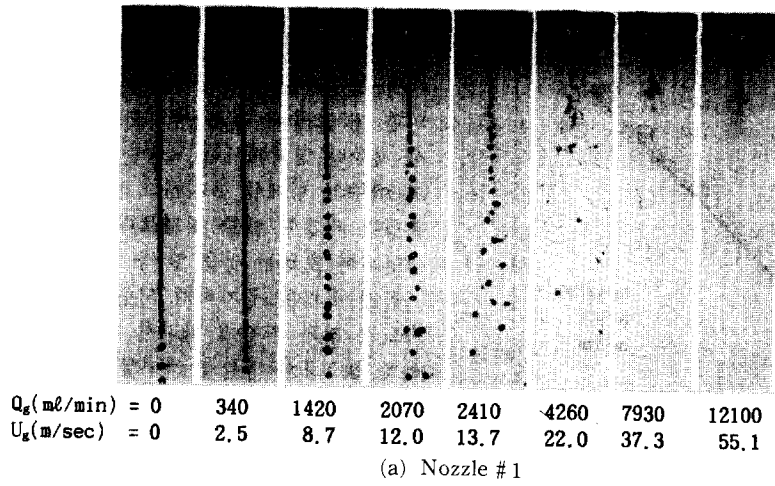
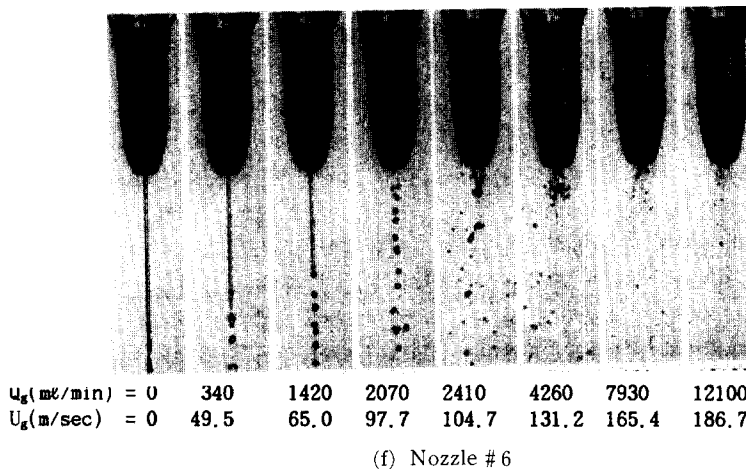
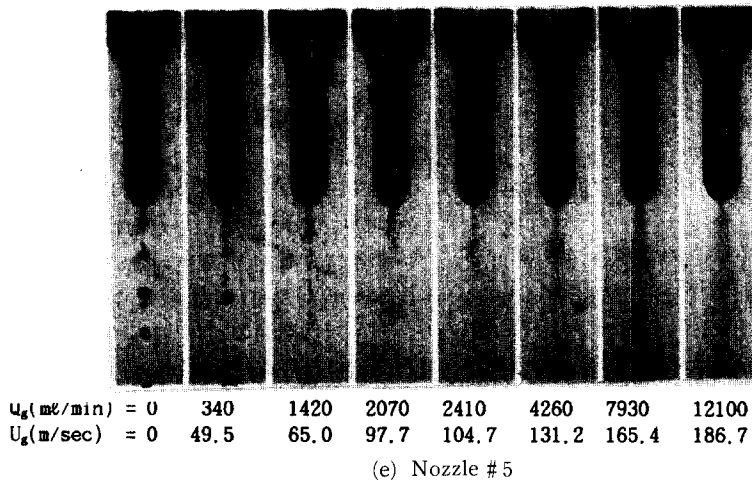
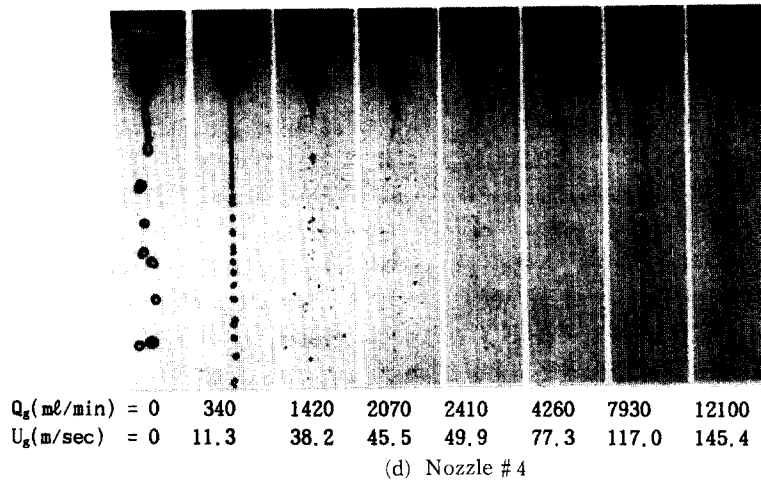


Fig. 9 Photographs of spray variation with increasing air flowrate ($Q_l=45$ ml/min)



(Fig. 9 continued)

기체유량에 대해서도 액주가 노즐 내벽에 부착되어 액주가 빨리 파괴됨을 알 수 있다.

Fig. 9의 (d), (e)는 Table 2의 노즐 4, 5의 경우이다. 혼합관의 직경 $D_m=0.84, 0.7$ mm로서 상대적으로 작고 혼합관의 길이 $l_m=6.5, 19.9$ mm로 크게 다른 노즐에서의 유동현상을 비교 조사한 것이다. 혼합관 직경이 액주의 직경보다 약간 큼에도 불구하고, $Q_g=0$ ml/min인 경우 액주는 혼합관을 관통하지 못하고 충전하여 흐르는 유동형태를 나타낸다. 이 경우 액주는 액체노즐에서 부터가 아닌 혼합관 선단에서 형성되기 때문에 액주직경은 더 크고, 이 액주로부터 분열되는 액적의 직경도 커지게 된다. 그러나 노즐내에 공기를 유입시키면 직경이 $D_m=0.84$ mm인 (d)의 경우에는 액주가 혼합관을 관통하게 된다. 이는 액주가 유동하면서 혼합관 내벽에 덩어리 형태로 부착되는 것을 기류가 노즐 밖으로 계속해서 밀어내어 유로를 확장시키는 데 주원인이 있으나, 빠른 속도의 공기가 액주에 가하는 마찰력으로 인해서 액주의 길이가 늘어나므로 직경이 다소 작아지는 데에도 원인이 있다고 볼 수 있다.

직경 $D_m=0.7$ mm인 (e)의 경우에는 공기유량이 증가하여도 액주가 전혀 노즐을 관통하여 흐르지 못하고, $Q_g=0$ ml/min인 경우에도 액주의 유동에 의해서 노즐내의 압력이 음압이 됨에 따라 공기가 혼입되어 흐르게 되며, 공기유량의 증가에 따라 기포류, 스테그류 유동의 형태를 거쳐 환상류 유동의 형태로 천이되어 감을 알 수 있다. 실제로 기포류, 스테그류 유동은 아주 작은 공기유량 범위에서 잠깐 나타나는 현상이고, 급속하게 환상류 유동으로 바뀌며, 이때 공기공급관 내부 압력 및 기류속도가 급격하게 증가하여 기류의 운동량이 커짐에 따라 액주는 혼합관내에서 중앙부는 액적류, 벽면은 액막류인 환상액적류로 변화되어 빠르게 분열된다.

또한 (f)의 경우에는 직경 $D_m=1.5$ mm이고, 혼합관 길이 $l_m=20.8$ mm인 경우의 유동형태로써 관경이 작은 노즐 4나 5에 비하여 액주가 혼합관 내벽에 부착하는 데는 많은 공기량이 요구됨을 알 수 있다. 액주에 횡진동이 발생하여 액주가 벽면에 부착되기 시작하는 초기 단계에는 액주의 직경보다 다소 큰 직경의 입자 또는 액사가 혼합관 하류에 형성되어 기류에 동반되어 흘러내려오며, 이때는 직경이 큰 액적을 형성한다. 공기유량이 증가할수록 액주는 나선형으로 혼합관 내벽에 충돌하여 퍼

지게 된다. 이 교란의 위치는 점차 노즐의 상류쪽으로 이동하며, 기류의 난류강도의 증가에 따라 분열점의 액주는 침상으로 더욱 가늘어지고 흔들리는 주기가 짧아지며, 전방향으로 고르게 퍼지게 되므로 액주는 액막형태로 변화되어 혼합관 내벽을 따라 이동하면서 액막을 형성하게 된다.

관통하는 액주는 공기 유량의 증가에 따라 분열 위치가 상류로 이동하게 되는데, 이것은 액주와 기류의 속도차에 의한 전단력이 액주의 축방향 운동량보다 커져서 액주가 반경방향으로 운동하는 횡진동을 일으키며, 발생위치는 상대속도의 증가에 따른 전단력이 커지므로 액주상류로 옮겨가며, 점차 액주의 분열부분은 더욱 가늘고 예리하게 된다. 따라서 공기유량이 증가함에 따라 교란위치가 혼합관 상류로 이동해 가고, 가늘고 고른 액사가 비교적 균일하게 혼합관 상류내면에 공급되므로써, 혼합관의 길이가 길수록 충분히 발달된 얇고 균일한 액막을 형성할 수 있는 면적이 상대적으로 증가하게 된다.

한편 액주의 분열길이는 사진으로부터 알 수 있는 바와 같이 분무의 진행초기 단계의 적은 공기유량에서 분열길이가 급격하게 감소하며, 공기유량이 증가하여 양호한 미립화가 얻어지는 공기유량에서는 액주분열위치가 혼합관의 상류로 이동하여 혼합관 입구 근처에서 일정하게 유지되는 것으로 밝혀졌다.

결국 내부혼합식 2유체 노즐에 있어서 혼합관을 관통하는 액주는 혼합관 길이가 길면 액주가 혼합관 내벽에 부착되어 유동하므로써 액막분열의 형식이 되며, 반대로 혼합관 길이가 아주 짧은 경우에는 액주가 가늘어져서 떨어져나가는 액주 분열 형식이 된다. 혼합관의 직경이 작고 길수록 동일 유량을 흘리기 위해서는 고압의 공기가 필요하며, 노즐의 직경이 클수록 공기량은 많아지나 압력은 낮아짐을 알 수 있다. 또한, Fig. 9 (e)와 같이 혼합관 내부가 액체로 채워진 경우에 있어서 공기유량의 변화에 따라 노즐내부의 유동양식이 변화되고, 공기유량이 많아지면 환상류 또는 액적유동이 되어 액막분열이 증가 됨을 알 수 있다.

기체공급관 내에서의 액주형태는 모든 노즐에 대해서 동일하게 평활류의 형태가 유지됨을 알 수 있다. 이는 기체공급관 단면적이 혼합관 단면적에 비해 대단히 크기 때문에 기체공급관 내의 공기유속이 느려서 액주에 미치는 교란이 작은 반면 액주는

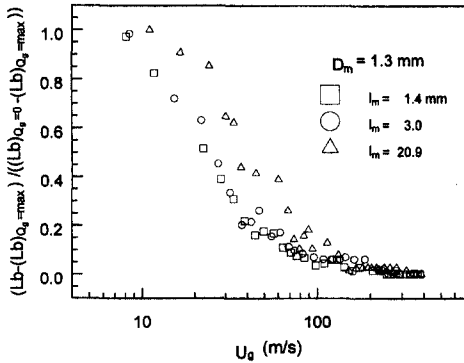


Fig. 10 Effect of mixing tube length on the breakup length of liquid jet

액체노즐에서 분사된 직후이기 때문에 운동에너지가 커서 공기의 운동량이 액주유동에 영향을 미칠 수 없기 때문으로 생각된다.

3.6 동축기류가 분열길이에 미치는 영향

동축기류에 동반되어 유동하는 액주는 기류의 작용으로 인하여 불안정한 상태가 되어 축방향으로 진동하며 액주의 표면에 횡진동파가 형성된다. 이때 액주면을 따라 축방향으로 움직이는 동반기류에는 국부적인 속도차가 발생하고, 액주 요철위치에 따라 액주표면에 각각 다른 압력구배가 형성된다. 축방향위치에 따른 액주주위의 압력차는 액주의 횡진동을 촉진하여 액주가 반경방향으로 요동하게 되고, 요동하는 액주에 기류가 연속적으로 충돌하여 액주는 더욱 가늘어져서 액사의 형태로 분열이 시작된다. 분열된 액사는 기체와 충돌을 거듭하면서 더욱 작은 액적으로 미립화되어 가는 일련의 과정을 거치게 된다.

액체노즐은 직경 $D_i=0.68$ mm로서 액체유량은 $Q_l=45$ ml/min이고, 이때 속도는 약 2.07m/sec이다. 이 액체유량은 액체노즐에서 분출되는 액주가 평활류이고, 분열길이가 가장 긴 유량에 해당한다.

Figs. 10, 11은 이러한 액체 분사조건 하에서 Table 1의 노즐 5를 제외한 5개의 노즐의 내부유동형태를 공기유속의 변화에 따라 촬영한 사진으로부터 액주분열길이를 측정하였다.

이 분열길이 Lb는 공기 공급 관에서 액체공급 위치가 노즐별로 각각 다르기 때문에 이를 감안한 형태의 분열길이를 다시 표현하여 사용하는 것이 기류에 의한 영향을 정확하게 반영할 수 있다. 따라서 임의의 공기량에 대한 분열길이 Lb와 $Q_g=\max$

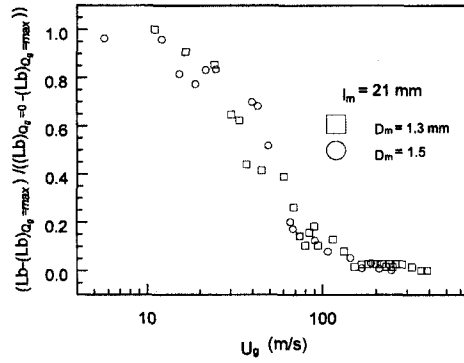


Fig. 11 Effect of mixing tube diameter on the breakup length of liquid jet

상태의 분열길이의 차를 $Q_g=0$ 와 $Q_g=\max$ 인 상태의 분열길이의 차로 무차원화 $((Lb - (Lb)_{Qg=\max}) / ((Lb)_{Qg=0} - (Lb)_{Qg=\max}))$ 하여 분열길이를 나타냄으로서 결과적으로 각 노즐의 최대 분열길이인 기준 분열길이 $((Lb)_{Qg=0} - (Lb)_{Qg=\max})$ 에 대한 감소율을 쉽게 알아볼 수 있도록 나타낸 것이다. 이와 같이 하여 혼합관 길이와 직경이 분열길이에 어떻게 영향을 미치는가를 기체유량을 변화시켜 가며 알아보았다.

Fig. 10은 $Q_g=0$ ml/min일 때에 관통 유동 액주가 되는 경우로서 혼합관 직경 $D_m=1.3$ mm로 동일하고, 혼합관 길이는 각기 다른 노즐 1, 2, 3에 대하여, 동축기체 유량의 증가가 액주 분열길이에 미치는 영향을 조사한 것이다. 혼합관의 길이가 짧을수록 기류속도 100 m/sec까지는 기류속도 별 분열길이가 짧게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 액주가 대기와 일찍 접촉하게 되는 짧은 노즐인 경우에 기류 및 액주가 정지 대기와의 충돌에 의해 더욱 불안정해져 액주의 분열을 촉진하는 것으로 판단된다.

Fig. 11은 노즐 3, 6의 경우로서, 혼합관의 길이가 유사하고, 직경이 다른 때 기류속도의 증가에 따른 액주의 분열길이에 미치는 혼합관 직경의 영향을 조사한 것이다. 이 결과만으로는 기류속도에 따른 두 노즐의 분열길이의 변화는 크게 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 10, 11을 통해서 알 수 있는 바와 같이 기류속도는 약 10 m/sec 정도까지는 액주 분열길이에 영향을 미치지 못하지만, 그 이상으로 기류속도가 증가하게 되면 분열길이는 급격하게 감소하기 시작하여 $U_g=200$ m/sec를 넘어서게 되면 분열길

이의 감소율은 0에 접근하게 되어 더 이상 길이의 감소가 일어나지 않게 된다.

동축기류에서는 액주의 분열 또는 입경의 크기를 액류와 기류의 운동량을 나타내는 두 유체의 상대 속도의 함수로써 나타내는 경우가 많다. 두 유체간의 운동량의 전달은 주로 두 유체의 계면을 통해서 이루어지며, 이는 두 유체가 서로 운동에너지 교환할 수 있는 충분한 조건하에서 달성된다. 이러한 측면에서 내부혼합식 노즐은 외부혼합식에 비해 대단히 효과적임을 알 수 있다. 왜냐하면 일정한 단면을 속도가 다른 유체가 동시에 유동하므로써 벽면과의 마찰에 의한 에너지의 손실을 제외하고는 지속적으로 혼합유로내에서 에너지의 교환이 이루어져서 어느 시간이 지나면 두 유체의 평균속도가 같아지는 쪽으로 작용하게 되기 때문이다.

4. 결 론

2유체 분무노즐의 분열기구를 조사할 목적으로 원형단면의 노즐을 통해 대기중에 분출되는 액주의 분열특성과 긴 평활류 액주에 가해진 기류가 노즐 내부의 유동형태 및 분열길이에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정지 대기중에 분출되는 액주분열길이 변화 곡선을 통하여 알 수 있는 것은 액체의 분출속도에 따라 유동형태 및 증감이 좌우되며, 액체노즐 직경이 클수록 분열길이는 전반적으로 길어지는 것으로 나타났다.

(2) 분열길이의 동일 액체유량에서의 변동폭 (L_{bosc})은 대체로 분출속도에 따른 분열길이 변화와 유사한 형태를 보이며, 증류유동에서는 분출속도의 증가에 따라 급격하게 증가하고 증류와 천이류의 경계에서 최대가 된다.

(3) 난류 유동영역의 분열길이 변동폭은 분열길이 평균치의 약 0.55~0.7 범위에서 일정해진다.

(4) 혼합관과 액주의 직경에 따라 액주 관통 유동, 부분 환상유동 및 환상유동 등 다양한 유동형태를 관찰할 수 있었으며, 내부혼합식 2유체 노즐에 있어서 혼합관을 관통하는 액주는 혼합관 길이가 길어지면 액막분열의 형식이 되며, 반대로 혼합관 길이가 아주 짧아지면 액주분열 형식이 된다.

(5) 기류속도 증가에 따른 분열길이 변화율은 혼합관 길이에 크게 영향을 받아 혼합관 길이가 짧을수록 급격하게 작아지며, 혼합관 직경에는 크게 영

향을 받지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) Rayleigh, L., 1926, *On the Instability of Jets*, Macmilan, London, Vol. 2, pp. 343~375.
- (2) Weber, C., 1931, "Zum Zerfall DimesFlussigkeits Strahles," *Zichr. f. angew. Math und Mech.*, Band11, Heft2, pp. 136~154.
- (3) Fenn, R. W. and Middleman, S., 1969, "Newtonian Jet Stability: The Role of Air Resistance," *AICHE. J.*, Vol. 15, pp. 379~383.
- (4) Phinney, R. E. J., 432, "Stability of a Laminar Viscous Jet-The Influence of the Initial Disturbance level," *AICHE. J.*, Vol. 18, p.
- (5) Kitamura, Y. and Takahashi, T., 1978, "Influence of Nozzle Length on Breakup of a Liquid Jet," *The 1st International Conference on Liquid Atomization and Spray System*, pp. 1~7.
- (6) Hiroyasu, H., Shimizu, M. and Arai, M., 1982, "The Breakup of High Speed Jet in a High Pressure Gaseous Atmosphere," *The 2nd International Conference on Liquid Atomization and Spray System*, pp. 69~74.
- (7) Arai, M., Shimizu, M. and Hiroyasu, H., 1985, "Breakup Length and Spray of High Speed," *The 3rd International Conference on Liquid Atomization and Spray System*, IB/4/1-IB/4/10.
- (8) Arai, M., Shimizu, M. and Hiroyasu, H., 1988, "Break-up Length and Spray Formation Mechanism of a High Speed Liquid Jet," *The 4th International Conference on Liquid Atomization and Spray System*, pp. 177~184.
- (9) Hiroyasu, H., Arai, M. and Shimizu, M., 1991, "Break-up Length of a Liquid jet and Internal Flow in a Nozzle," *The 5th International Conference on Liquid Atomization and Spray System*, pp. 275~282.
- (10) Arai, M., Shimizu, M. and Hiroyasu, H., 1991, "Similarity between the Break-up Lengths of a High Speed Liquid Jet in a Atmospheric and Pressurized Conditions," *The 5th International Conference on Liquid Atomization and Spray System*, pp. 563~570.

- (11) 이충원, 김덕줄, 1988, "평활류의 분열길이에 미치는 동축기류의 영향," 대한기계학회 논문집, 제12권, 제6호, pp. 1390~1398.
- (12) 김덕줄, 1989, "동축기류에 의한 원통형 액주의 분열기구," 박사학위 논문, 경북대학교 대학원.
- (13) Farago, Zoltan and Chigier, N. A., 1992, "Morphological Classification of Disintegration of Round Liquid Jets in a Coaxial Air Stream," *Atomization and Spray*, Vol. 2, pp. 137~153.
- (14) Grant, R. P. and Middleman, S., 1966, "Newtonian Jet Stability," *AIChE. J.*, Vol. 12, No. 4, pp. 669~678.
- (15) Sterling, A. M. and Sleicher, C. A., 1975, "The Instability of Capillary Jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 68, Part. 3, pp. 477~495.
- (16) Lin, S. P. and Kang, D. J., 1987, "Atomization of a Liquid Jet," *Phys. Fluids*, Vol. 30, No. 7, pp. 200~2006.
- (17) Lin, S. P. and Lian, Z. W., 1990, "Mechanism of the Breakup of Liquid Jets," *AIAA J.*, Vol. 28, No. 1, pp. 120~126.
- (18) Lin, S. P. and Hudman, M. D., 1994, "Regimes of Jet Breakup," *The 6th International Conference on Liquid Atomization and Spray System*, Paper I-1, pp. 1~7.
- (19) Mahoney, T. J. and Sterling, A. M., 1978, "Breakup Length of Laminar Newtonian Liquid Jets in Air," *The 1st International Conference on Liquid Atomization and Spray System*, pp. 9~12.