

정지공기중 점성유체 분류의 분열길이 측정

Measurement of Breakup Length of Viscous Liquid Jet in Stagnant Air

임 정 현*, 류 근 영*, 임 성 빈*, 노 수 영**
 Jung Hyun Rhim, Keun Young Ryu, Sung Bin Lim, Soo Young No,

ABSTRACT

The measurement of breakup length of viscous liquid jet in stagnant air was conducted by a 3CCD digital video camera. The nozzle diameters of 4, 6, 8mm with $L/d=50$ were selected and the dynamic viscosity of viscous liquid made of glycerine and water was in the range of $1.061 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ to $4.935 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

The critical velocity is decreased and the breakup length is increased with the increase of nozzle diameter at the same dynamic viscosity of liquid. At the same nozzle diameter, the breakup length and the critical velocity are both increased with the increase of dynamic viscosity of liquid. It is found in the theoretical analysis that the initial disturbance level is the main cause of occurrence of critical Reynolds number in the stability curve.

The comparison of experimental critical Reynolds number and the empirical correlation by Tanasawa and Toyota reveals the relatively good agreement.

Keywords : Breakup length(분열길이), 3CCD digital video camera(3CCD 디지털 비디오 카메라), Critical Reynolds number(임계 레이놀즈 수), Initial disturbance level(초기 교란의 크기), growth rate of dominant wave(지배적 파의 성장율)

1. 서론

노즐에서 분출하는 액체분류가 액적으로서의 분열현상은 오랫동안 이론적 및 실험적 연구 대상이 되어 왔다. 미립화의 질을 향상시키고 분무형성의 양호한 제어를 위해서는 액체분류의 불안정성에 대한 이해가 필요하다. 분류의 거동은 분류속도와 분열길이 사이의 관계를 실험적으로 결정함에 의해 규명된다. 분류의 분열길이의 변화와 노즐 출구의 평균속도와 관계를 그래프로 나타낸 것을 분류 안정곡선이라고 한다. 분열길이는 노즐출구에서 액적 형성이 일어나는 첫번째 분열지점까지로 측정되는 분

류의 연속적 액주 길이로 정의된다. 분열길이에 미치는 요인으로는 주로 점도의 영향을 나타내는 무차원수로 Ohnesorge수, 노즐형상비, 주변압력(또는 밀도), 노즐입구형상 등을 들 수 있다.

기존의 연구중 중요한 실험 및 이론적 연구를 열거하면 다음과 같다. Grant와 Middleman^[1]은 물과 글리세린, 에탄올, 에틸렌글리콜을 혼합하여 동점도 $1.312 \times 10^{-4} \sim 9.127 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 범위에서 여러 가지 노즐형상비($L/d=6.9 \sim 148$)의 요각(re-entrant) 형태의 노즐에 대해 분열길이를 측정하고 기존의 Weber이론을 수정 보고하였다.

Fenn과 Middleman^[2]은 노즐형상비 52, 90,

* 충북대학교 대학원

** 충북대학교 농업기계공학과

480에 대해 동점도범위 $5.104 \times 10^{-5} \sim 1.529 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 주변압력을 대기압 이하로 $6.7 \times 10^{-4} \text{MPa}$ 까지 조건에서 Grant와 Middleman^[1]의 경우와 같은 노즐의 액주의 분열길이를 측정하였다. 주변압력의 영향은 주변 기체의 밀도에 기초한 주변 Weber수가 5.3이하에서는 액적의 분열곡선은 주변압력의 영향을 받지 않는다고 보고하였다.

新井^[3]은 노즐형상비 1.0~50 범위에서 노즐입구형상이 직각절단형(sharp-edged)과 둥근 절단형(round-edged)인 노즐에 대해 대기압하에서 액체의 동점도 $0.66 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 범위의 분류의 분열길이를 측정하였다. 노즐형상비의 증가에 따라 안정성곡선에서 최초 최대점을 나타내는 임계속도가 노즐입구 형상에 따라 반대의 경향을 나타냄을 보고하였다. 직각절단형의 경우 형상비가 증가하면 임계속도가 선형적으로 완만하게 증가하고 같은 형상비에서 액체의 동점도가 증가하면 임계속도가 감소한다. 그러나 둥근 절단형의 경우 같은 형상비에서 직각절단형과 같이 동점도가 증가하면 임계속도가 감소하지만 형상비의 증가에 따라 임계속도는 감소하였다.

액체분류의 안정성에 대한 1974년까지 연구에 대한 총설은 McCarthy와 Molly^[4]에 의해 발표되었다. 최근까지의 연구에 대한 일반적인 정리는 Lefebvre^[5]와 Bayrel과 Orzechowski^[6]의 의해 이루어졌다.

Sterling과 Sleicher^[7]는 노즐형상비 0.25, 49, 96에 대해 액체동점도 $9.328 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$, $2.717 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, $3.5 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 에 대해 액주의 분열길이를 측정하였고 Weber 이론식의 수정을 제안하였다.

근래 Leroux 등^[8]은 직각절단형의 노즐입구형상에서 $1 \times 10^{-6} \sim 5.885 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 범위의 액체 동점도, 노즐형상비 10, 20, 100의 경우 주변 압력을 0.1~8.1MPa범위를 8개로 나누어 액주 분열 현상을 관찰하고 Weber 이론의 수정을 제안하였다.

한편 주변압력의 영향을 고려하지 않은 총류 영역에서의 Weber의 무차원식을 Grant와

Middleman^[1], Mahoney와 Sterling^[9]이 이용하기 간편하도록 수정을 하여 제시하였다.

이 연구는 액체의 점도가 분열길이에 미치는 영향을 조사하고 기존의 이론식 및 경험식들과 비교하여 새로운 경험식을 제시하기 위한 기초 자료를 얻는데 그 목적이 있다.

2. 이론 해석

액체 분류의 안정성에 대한 이론 분석은 Weber의 특성 방정식에 의해 주어진다. 분류 주변의 공기 역학적 영향을 고려하게 되면 특성 방정식은 복잡하여 수치해석적 방법에 의해 해를 얻을 수밖에 없어 이용하기에 불편하다. 그러나 주변의 압력 영향을 고려하지 않을 경우 다음과 같은 무차원식이 Weber에 의해 제안되었다.^[8,10]

$$L_b = \ln(d/2\delta_0)(V/a_{\max}) \quad (1)$$

여기서 d 는 분류의 지름, L_b 는 분열길이이며 a_{\max} 는 지배적인 파의 성장율로 다음과 같이 주어진다.^[11]

$$a_{\max} = 1 / \left[\left(\frac{8\rho r^3}{\sigma} \right)^{0.5} + \frac{6\mu r}{\sigma} \right] \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면

$$L_b/d = \ln(d/2\delta_0)(We^{0.5} + 3We/Re) \quad (3)$$

가 된다. 여기서 We 는 Weber수, Re 는 Reynolds수이고, r 은 분류의 반지름이다.

그리고 $\ln(d/2\delta_0)$ 는 초기교란의 크기이며 이 값은 미리 정할 수 없고 노즐형상등 실험조건에 따라 달라진다. Weber는 실험데이터로부터 그 값을 12라고 보고하였으나 Grant와 Middleman^[1]은 다음과 같은 일반식을 제안하였다.

$$\ln(d/2\delta_0) = 7.68 - 2.66 \ln(Oh) \quad (4)$$

더 나아가 근래 Mahoney와 Sterling^[9]은 총류 유동영역에서 주변조건의 영향을 고려한 다음식을 제안하였다.

$$L_b/d = \frac{\ln(d/2\delta_0)(We^{0.5} + 3We/Re)}{f(Oh, We_d)} \quad (5)$$

여기서,

$$f(Oh, We_d) = \frac{1.96Oh + 2G\{1 - G^2 + \frac{1}{2}C_1 We_d(0.9G - 0.2)\}^{0.5}}{(1 + 1.96Oh)}$$

$$G = 0.707 \exp(0.035 We_d), \quad C_1 = 0.175,$$

We_d 는 주변Weber 수($\rho_g d v^2 / \sigma$)이다.

한편 안정성곡선에서 최초의 최대분열길이를 주는 임계속도, 즉 임계 Reynolds수(Re_c)의 예측에 관한 경험식이 棚澤과 豊田^[12]에 의해 다음과 같이 제안되었다.

$$St^{0.12} Re_c^{0.39} = 10 \quad (6)$$

여기서 St 는 안정수로 Ohnesorge수와 같다. 이 식을 변형하면

$$Re_c = 367 Oh^{-0.31} \quad (7)$$

가 된다. 또 Grant와 Middleman^[11]은 다음과 같이 임계 Reynolds수를 예측하였다.

$$Re_c = 325 Oh^{-0.28} \quad (8)$$

3. 실험장치 및 방법

그림 1.에 실험장치의 개략도를 나타내었다.

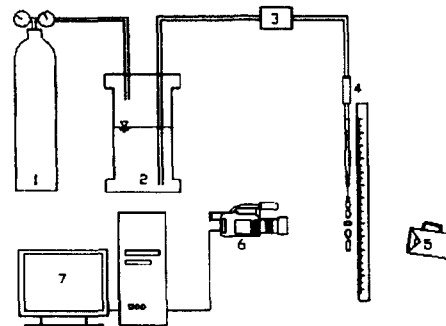
액체 분류의 분열길이를 측정하기 위한 실험장치는 질소탱크, 압력용기, 유량계, 노즐, 스트로보스코프, 디지털 비디오 카메라, DV정지 화면 frame grabber가 장착된 컴퓨터로 구성되어 있다.

질소탱크에 부착된 압력계를 사용하여 $3kg/cm^2$ 의 일정압력을 압력용기에 가하고 압력용기에 달려있는 니들밸브를 열어 유량을 조절하며 정량의 액체를 체적식유량계(NITTO SEIKO, MNV14401)로 측정한 후 노즐에 공급한다. 노즐에서 분사된 액체 분류의 분열지점을 스트로보스코프(SEORIM DX-525X)를 광원으로 하여 관찰하고 디지털 비디오 카메라로 촬영을 한다.

이 실험에서는 3CCD 디지털 비디오 카메라(SONY, DCR-VX1000)을 사용하였으며 1/3" CCD 고체촬상소자를 사용한 NTSC방식의 카메라이다. 디지털비디오카메라의 연속적 영상 신호를 받아 DV정지화면 frame grabber로 개의 정지화면으로 획득하고 파일로 편집한다.

분열길이는 액체분류와 함께 촬영되어 저장된 기준자(길이 1m)에 의해 측정된다. 조건당 30개의 분열길이 화면을 획득하여 분석한 후 평균값을 분열길이라고 정하였다.

노즐 몸체는 투명아크릴로 제작하였으며 노즐 오리피스는 스테인레스 스틸로 제작하였다. 표 1에 이 실험에서 사용한 노즐의 기하학적 특성을 나타내었다. 점성유체는 수돗물과 글리세린(동양화학, 순도 99%)을 중량비로 혼합하여 제조하였으며 혼합액의 표면장력과 점도는 표면장력계(CBVP-A3, KYOWA Interface Science Co.)와 점도계(B8H, TOKYO KEIKI Co.)를 사용하여 측정하였다. 각 혼합액 물리적 성질을 표 2에 나타내었다.



1. N₂ Tank 2. Pressure vessel
3. Flowmeter 4. Nozzle
5. Stroboscope 6. 3CCD camera
7. Computer with frame grabber.

Fig. 1 Experimental apparatus for measuring breakup length

Table 1. Geometrical characteristics of nozzle

nozzle number	d (mm)	L/d
1	4.0	50
2	5.0	50
3	6.0	50
4	7.0	50
5	8.0	50

Table 2. Physical properties and Ohnesorge number of liquids tested.

nozzle number	solution	physical properties	Oh No. ($\times 10^3$)
1, 2, 3, 4, 5	water	$\rho = 997.1 \text{ kg/m}^3$ $\nu = 1.061 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ $\sigma = 7.26 \times 10^{-2} \text{ N/m}$	Oh ₁ : 1.66 Oh ₂ : 1.485 Oh ₃ : 1.36 Oh ₄ : 1.241 Oh ₅ : 1.175
1, 3, 5	Glycerine/ water	20:80 $\rho = 1047.6 \text{ kg/m}^3$ $\nu = 1.365 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ $\sigma = 7.0 \times 10^{-2} \text{ N/m}$	Oh ₁ : 2.64 Oh ₂ : 2.16 Oh ₃ : 1.87
1, 3, 5		40:60 $\rho = 1104.4 \text{ kg/m}^3$ $\nu = 2.20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ $\sigma = 6.88 \times 10^{-2} \text{ N/m}$	Oh ₁ : 4.41 Oh ₂ : 3.6 Oh ₃ : 3.12
1, 3, 5		60:40 $\rho = 1151.2 \text{ kg/m}^3$ $\nu = 3.553 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ $\sigma = 6.78 \times 10^{-2} \text{ N/m}$	Oh ₁ : 7.3 Oh ₂ : 5.98 Oh ₃ : 5.18
1, 3, 5		80:20 $\rho = 1205.6 \text{ kg/m}^3$ $\nu = 49.353 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ $\sigma = 6.40 \times 10^{-2} \text{ N/m}$	Oh ₁ : 107.1 Oh ₂ : 87.5 Oh ₃ : 75.73

4. 결과 및 고찰

그림 2는 동점도($\nu = 2.200 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)가 일정할 때 분류속도에 따른 분열길이의 변화를 노즐크기에 따라 나타낸 것이다. 그림으로부터 노즐크기의 증가에 따라 임계속도는 작아지

며 총류영역에서 노즐 크기가 증가할수록 분열 길이는 증가함을 알 수 있다. 다른 동점도의 유체 경우에도 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

그림 3은 4mm 노즐에서 분류속도에 따른 분열길이의 변화를 동점성계수에 따라 나타낸 것

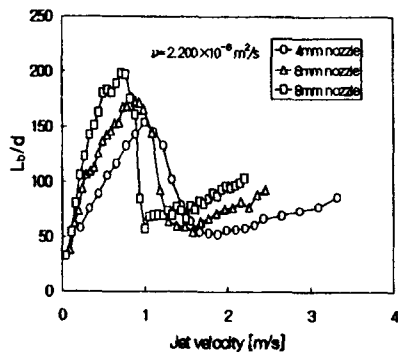


Fig. 2 Variation of breakup length with jet velocity for different nozzle diameters

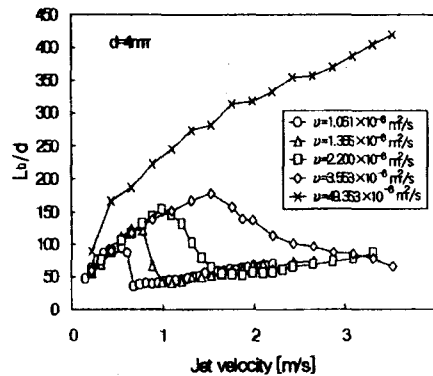


Fig. 3 Variation of breakup length with jet velocity for different kinematic viscosities

이다. 동점성계수가 $\nu = 4.9353 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 일 경우를 제외하고 각 동점성계수에 대해 임계속도가 존재함을 알 수 있다. 또한 층류영역에서 동점성계수가 증가할수록 분열길이가 증가함을 알 수 있다. 그 이유는 점도가 높게 되면 지배적인 파의 성장율을 지연시켜 분열길이가 점도가 낮은 경우에 비해 더 길어진다고 가정하는 것이 타당하다. 다른 노즐 크기의 경우에도 같은 경향을 나타내었다.

그림 2와 3의 결과는 기존의 연구와 비교할 때 新井等^[3]의 실험 결과와 일치하고 있다. 식 (1)에서 지배적인 파의 성장률 α_{\max} 와 분류속도와의 관계를 알아보기 위해 그림 4에 분류속도의 증가에 따른 α_{\max} 의 변화를 실험값을 층류영역과 난류영역으로 나누고 각 노즐 크기에 대해 동점도 $\nu = 1.365 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 경우 식 (1)의 이론값을 함께 나타내었다. α_{\max} 은 속도가 증가함에 따라 층류영역에서 서서히 증가하다가 급격하게 감소한 후 다시 증가하기 시작하며 난류영역으로 가면서 계속 증가한다. 이것은 Weber식, 즉 식 (2)를 층류영역에서 적용하는 것이 가능하며 임계속도 내지 임계 Reynolds 수가 일어나는데 영향을 미치는 것을 의미한다.

그림 5는 Reynolds 수의 증가에 따른 초기 교란의 크기 $\ln(d/2\delta_0)$ 와 V/a_{\max} 의 변화가 분열길이에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 노즐크기 6mm, 동점도 $\nu = 1.365 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 경우로 속도가 증가함에 따라 층류영역에서 $\ln(d/2\delta_0)$ 의 값은 그다지 변하지 않다가 난류영역에 접근하면서 급격히 감소하여 속도가 더 증가하면 거의 일정한 값을 나타낸다. 반면 V/a_{\max} 은 속도가 증가함에 따라 선형적으로 계속 증가한다. 분열길이가 최초로 최대가 되는 임계 Reynolds 수와 $\ln(d/2\delta_0)$ 가 급격히 감소하는 Reynolds 수가 일치함을 알 수 있다. 이러한 현상은 다른 노즐크기, 다른 동점도의 액체에서도 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이것은 분류 속도의 증가에 따라 어느 속도까지 초기 교란의 크기는 그다지 변하지 않다가 어

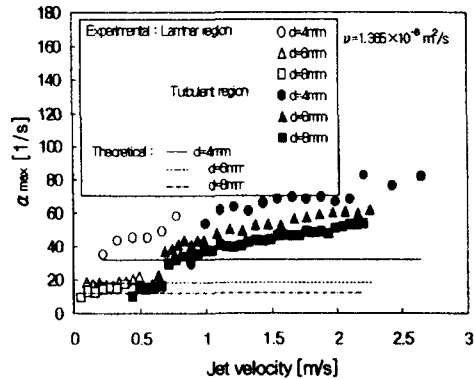


Fig. 4 Variation of growth rate of dominant wave with jet velocity.

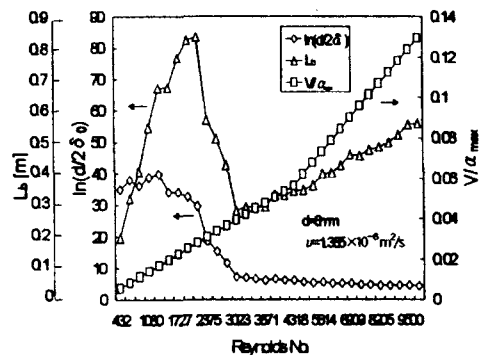


Fig. 5 Effect of $\ln(d/2\delta_0)$ and V/a_{\max} on breakup length.

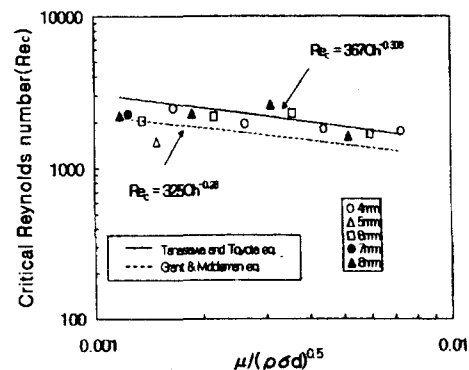


Fig. 6 Variation of critical Reynolds number with Ohnesorge number for different nozzle diameter

는 속도 이후 급격히 감소하여 그에 따라 주위 공기의 역학적 영향으로 지배적인 파의 성장율이 증가하여 분열길이가 감소하는 것으로 생각된다. 따라서 임계 Reynolds 수가 일어나는 현상은 초기 교란의 크기가 감소하면서 나타나는 것으로 이해할 수 있다.

이런 사실은 근래 주변압력이 대기압이상에서 물의 분류에 대한 실험과 Weber이론의 수정을 제시한 Leroux등^[13]의 연구결과와 일치한다.

또 Masour와 Chigier^[10]의 경우도 안정성곡선에서 최대와 기울기 부호의 변화가 생기는 것은 지배적인 파의 성장률의 증가보다는 교란의 초기크기에 의해 지배받는다 고 하였다.

그림 2와 그림 3으로부터 임계 Reynolds 수는 노즐크기 또는 L/d 와 액체의 점도에 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 점도가 임계 Reynolds 수에 미치는 영향을 알아보기 위해 Ohnesorge 수와 임계 Reynolds 수와의 관계를 여러 가지 노즐크기에 대해 실험값과 경험식을 함께 그림 6에 나타내었다. 실험범위중 Ohnesorge 수가 0.07573이상에서는 임계 Reynolds 수가 나타나지 않았으므로 그림에 포함되지 않았다. Ohnesorge 수가 증가함에 따라 임계 Reynolds 수는 실험조건 내에서 완만하게 감소함을 알 수 있다.

경험적 예측식과 비교할 때 임계 Reynolds 수는 식 (8)보다는 식 (7)과 비교적 잘 맞는 것으로 나타났다. 그러나 L/d 또는 노즐크기의 영향 및 그외의 영향을 알아보기 위해서는 체계적인 실험을 통해 경험식을 발전시킬 필요가 있다.

5. 결론

점성유체의 분열길이를 측정하여 기존의 경험식 및 이론식과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 같은 동점도의 액체에서 노즐크기가 증가할수록 분열길이는 길어지고 최대 분열 길이를 갖는 임계속도는 감소하였다.
- 2) 액체의 점도가 증가할수록 같은 노즐크기에서 분열길이는 길어지고 최대 분열 길이를 갖

는 임계속도는 증가하였다.

3) 임계 Reynolds 수의 출현은 초기 교란의 크기의 변화가 주된 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4) 임계 Reynolds 수와 Ohnesorge 수의 관계는 실험값과 棚澤과 豊田^[12]식이 비교적 잘 일치하였다.

기호설명

d : 노즐지름 [m]

L_b : 분열길이 [m]

L/d : 노즐형상비

Oh : 오네소계수(Ohnesorge number)

Re : 레이놀즈수(Reynolds number)

Re_c: 임계레이놀즈수(critical Reynolds number)

r : 분류반지름 [m]

v : 분류속도 [m/s]

We : 웨버수(Weber number)

We_a : 주변 웨버수(ambient Weber number)

그리스 기호

a_{max} : 지배적 파의 성장율

δ_0 : 교란의 초기 폭 [m]

μ : 점성계수 [Pa · s]

ν : 동점성계수 [m²/s]

ρ : 밀도 [kg/m³]

σ : 표면장력 [N/m]

아래첨자

a : 주변(ambient)

b : 분열(breakup)

c : 임계(critical)

g : 가스

max : 최대

0 : 초기

참고문헌

1. R.P. Grant and S. Middleman, Newtonian Jet Stability, *AIChE J.*, Vol. 12, No.4,

- pp.669-678, 1966.
2. R.W.Fenn and S. Middleman, Newtonian Jet Stability, The Role of Air Resistance, *AIChE J.*, Vol. 15, No.3, pp.379-383, 1969.
 3. 新井雅隆, 清水正則, 廣安 博之, 高粘度液体噴流の微粒化形態, 燃料協會誌, 第70卷 第11卷, pp. 1032-1038, 1991.
 4. M.J.McCarthy and N.A. Molloy, Review of Stability of Liquid Jets and the Influence of Nozzle Design, *The Chemical Engineering Journal*, Vol.7, pp.1-20, 1974
 5. A.H. Lefebvre, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Pub. Co., 1989.
 6. L. Bayvel and Z. Orzechowski, *Liquid Atomization*, Taylor & Francis, 1993.
 7. A.M. Sterling and C.A.Sleicher, The Instability of Capillary Jets, *J. Fluid Mech.*, Vol. 68, pp.477-495, 1975.
 8. S.Leroux, C. Dumouchel and M. Ledoux, The Break-up Length of Laminar Cylindrical Liquid Jets: Modification of Weber's Theory, *Proc. of ICLASS-97*, Vol.1, pp.353-360, 1997.
 9. T.J.Mahoney and A.M.Sterling, The Break-up Length of Laminar Newtonian Liquid Jets in Air, *Proc. of ICLASS-78*, pp.9-12, 1978.
 10. A. Mansour and N. Chigier, Effect of Turbulence on the Stability of Liquid Jet and the Resulting Droplet Size Distributions, *Atomization and Sprays*, vol. 4, pp.583-604, 1994
 11. S. Middleman, *Modeling Axisymmetric Flows, Dynamics of Films, Jets, and Drops*, Academic press, 1995
 12. 棚澤 泰, 豊田章一郎, 高壓高速液流の微粒化の研究, 第2報, 日本機械學會論文集, 第20卷 第92号, pp.306-309, 1954.
 13. S. Leroux, C. Dumouchel and M. Ledoux, The Stability Curve of Newtonian Liquid Jets, *Atomization and Sprays*, Vol. 6, pp. 623-647, 1996.