

점성유체 분류의 분열현상

Disintegration Process of Viscous Fluid Jet

고길표* 서정덕** 노수영***
정회원 정회원 정회원
G. P. Ko J. D. So S. Y. No

1. 서론

미립화는 액체를 사용목적에 알맞은 크기의 액적으로 만드는 것으로써, 공업 분야 뿐만 아니라 의료분야, 컴퓨터 주변기기 및 농업분야 등에도 널리 응용되고 있다. 농업분야를 예로 들면 농약, 소독약, 살충제 살포, 농장에서의 살수, 축산에서 샤워 등에 응용되고 있으며, 더욱이 최근에는 환경 문제와 관련하여 분무기술의 질적 향상과 신기술이 요구되고 있다. 또한 현재 디젤엔진에서 사용되고 있는 화석연료를 대체하기 위한 여러 가지 대체연료(아마유, 유채유, 해바라기유와 같은 식물성 기름, 물과 비추멘(bitumen) 입자를 유화(乳化)한 오리멀전(orimulsion) 그리고 석탄과 물의 혼합물인 CWM(coal-water mixture) 등의 슬러리(slurry) 연료 등)는 기존의 디젤유 보다 높은 점도를 가지고 있으므로 분무형태가 기존의 디젤유와는 다르며 또한 이들의 미립화질을 개선시키기 위한 기초자료가 필요하다.

따라서 이 연구에서는 액체의 점도가 분열길이에 미치는 영향을 규명하기 위하여 대체연료의 점도에 해당하는 점성유체를 만들어 분열길이를 측정하였다. 기름이 다른 노즐 각각에 대해 분사속도를 변화시켜 분열길이의 변화를 측정하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험장치 구성

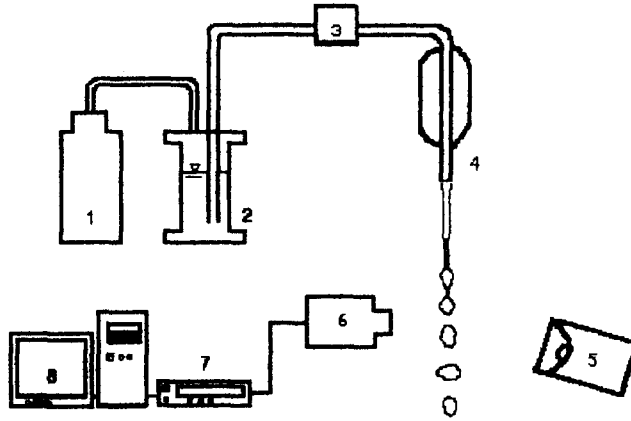
그림1에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 액적 분류의 분열길이를 측정하기 위한 실험장치는 압력탱크, 노즐, 질소탱크, 유량계, 스트로보스코프, CCD 카메라, VTR, 영상입력장치가 장착된 컴퓨터로 구성되어있다. 질소는 압력탱크의 시험 유체를 노즐로 분사시켜 주며, 스트로보스코프를 이용하여 분류의 분열을 잘 관찰할 수 있다. CCD 카메라, VTR, 영상입력장치는 영상처리를 수행하기 위한 장치이다.

노즐 몸체 제작을 동으로된 환봉을 대신하여 투명 아크릴로 제작하여 노즐 내에서의 기포 발생을 관찰할 수 있도록 하였으며, 노즐 오리피스는 스테인레스 스틸로 제작하였다. 이 실험에서는 세가지 노즐(지름이 4, 6, 8mm)을 사용하였으며, 이들 노즐의 오리피스 지름에 대한 길이의 비는 50으로 일정하게 하였다.

* 충북대학교 농과대학 농업기계공학과 대학원

** 충북대학교 농과대학 농업기계공학과 시간강사

*** 충북대학교 농과대학 농업기계공학과



1. Pressure tank 2. N₂ tank 3. Flowmeter 4. Nozzle 5. Stroboscope
6. CCD camera 7. VTR 8. Computer with grabber board

Fig. 1 Experimental apparatus for measuring breakup length.

나. 실험방법

점성유체는 수돗물과 글리세린(동양화학, 순도 99%)을 중량비로 혼합하여 만들었다. 식물성 기름의 점도 범위는 대략 $30 \sim 54 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ 이므로 이 범위에 해당하는 물과 글리세린 혼합액(글리세린의 함량 : 0, 65, 70, 75, 80%)을 제조하였다. 혼합액을 압력탱크에 넣고 질소로 압력을 가하여 압력탱크에 있는 니들밸브를 열어 유량을 조절하며 일정한 양의 액체를 노즐로 공급시켜준다. 이때 발생하는 액체 분류의 분열현상을 스트로보스코프로 관찰 및 분열지점을 CCD 카메라로 촬영하고, CCD 카메라로부터 얻은 영상을 VTR로 녹화한다. VTR로 녹화시킨 영상을 컴퓨터 이미지로 저장하고, 분열 길이 측정 소프트웨어를 실행하여 분열길이를 측정한다.

3. 결과 및 고찰

가. 분열지점의 정의

스트로보스코프를 광원으로 하여 분류의 분열현상을 CCD 카메라로 촬영한다. 이 영상을 컴퓨터로 입력시켜 영상을 디지털화하고 영상 평활화, 이진처리, 경계추출을 수행한다. 분류

Table 1. Comparison of breakup lengths from naked eyes and image processing.

Jet velocity [m/s]		0.13	0.25	0.49	0.61	0.73	0.98
Normalized breakup length [L _b /D]	naked eyes	39.4	71.5	45.9	47.5	49.1	54.8
	Image processing	41.7	73.0	46.4	44.8	49.2	57.5
Relative error[%]		5.8	2.1	1.1	5.7	0.2	4.9

의 진행방향인 세로 방향 액주에 해당하는 영역의 픽셀 색 농도 분포를 관찰하여 색농도값이 색농도가 갑자기 낮아지는 첫 번째 지점을 분열지점으로 하였다. 액체 분류의 분열길이는 노즐출구로부터 이 지점까지의 총 길이로 하였다.

영상처리 방법의 타당성을 조사하기 위하여, 액체 분류의 분열길이를 자를 사용하여 눈으로 관측한 결과와 영상처리를 수행한 결과를 표1에 비교하였다. 두 값의 최대 오차는 6% 미만으로 나타났다.

나. 노즐 지름과 점성계수의 변화에 대한 분열길이의 변화

지름이 4, 6, 8mm인 노즐에 대해 점성계수가 $1.188 \times 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$ 인 물 분류의 분열길이를 측정하여 그림2에 나타내었다. 물 분류의 분사속도가 증가함에 따라 나타나는 분열길이 변화 곡선은 일반적인 분류의 안전곡선의 경향을 따르는 것을 알 수 있다.

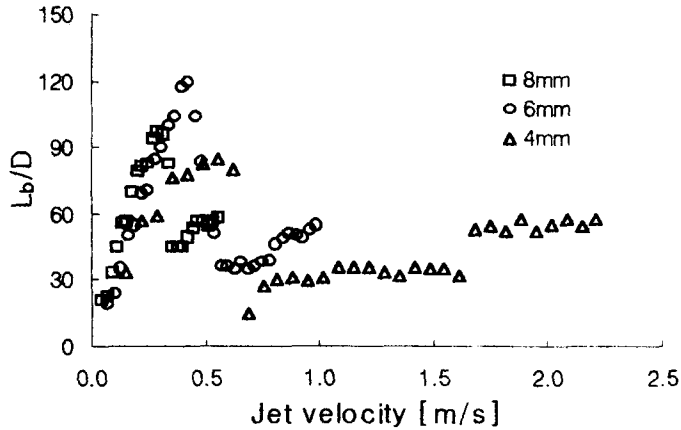


Fig. 2 Effect of jet velocity on normalized breakup length of tap water for different nozzles ($\nu=1.188 \times 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$).

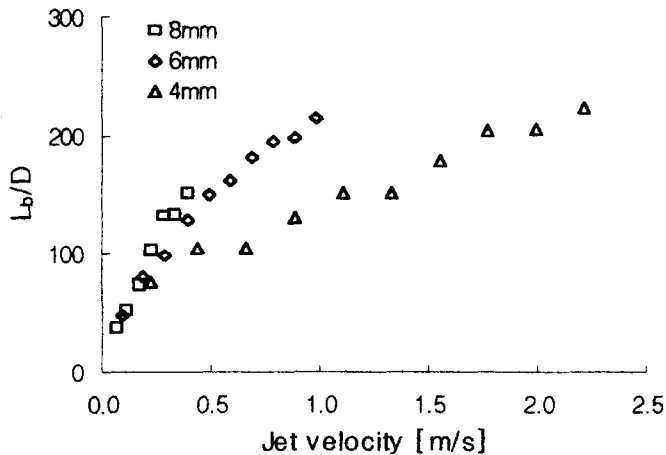


Fig. 3 Effect of jet velocity on normalized breakup length of a viscous liquid for different nozzles ($\nu=25.350 \times 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$).

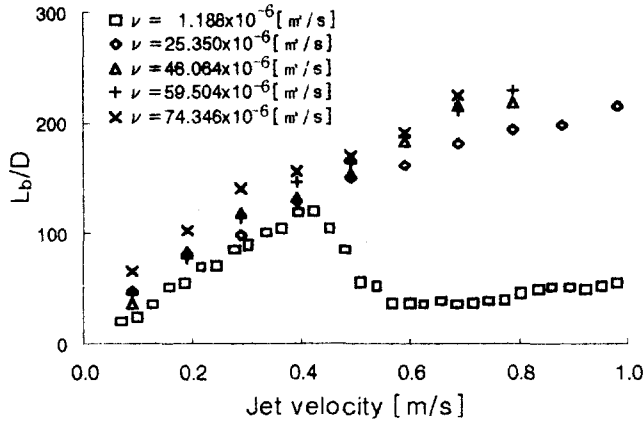


Fig. 4 Influence of jet velocity on normalized breakup length for different viscous liquids(D=6mm).

각각의 노즐에 대해 층류 흐름 지역에서 분열길이는 급격히 증가하여 임계점을 지나 급격히 감소하며, 노즐 지름이 커질수록 초기 분열길이의 증가 기울기가 커진다. 세 노즐에 대해 분열길이가 최대가 되는 지점은 분사속도가 0.3~0.6m/s 이며, 이에 해당하는 레이놀즈 수는 1800~2200 임을 알 수 있다. 실험시 압력을 각각의 노즐에 대하여 일정하게 하였기 때문에 노즐 지름의 크기가 증가하여도 분열길이가 증가하지 못한 것으로 생각된다.

그림3은 물과 글리세린을 중량비 35 : 65 로 혼합하였을 경우($\nu=25.350 \times 10^{-6}$ [m²/s]) 각각의 노즐에 대하여 분류속도가 분열길이에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 분류속도가 증가함에 따라 분열길이는 세 가지 노즐 모두 거의 선형적으로 증가하며, 노즐의 지름이 증가할수록 그 기울기는 커지는 것을 알 수 있다. 또한 같은 분류 속도에 대해 노즐 지름이 클수록 분열길이가 커졌으며 기존의 연구결과와 일치한다^[1,2,3,4].

그림4는 지름이 6mm인 노즐의 경우 점성유체의 동점성계수 변화에 따른 분류속도가 분열길이에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 분류속도가 증가할수록 점성유체의 동점성계수 변화에 대해 분열길이는 거의 선형적으로 증가한다. 또 동점성계수가 클수록 분류속도 증가에 따라 분열길이가 증가한다. 따라서 분류속도가 증가할수록, 점도가 클수록 분열길이는 증가하는 것을 알 수 있다.

다. 이론적 검증

Weber는 초기 액체 분류가 분사되어 액적을 형성할 때, Fourier급수를 이용하여 분열길이를 다음과 같은 식으로 나타내었다.^[5,6,7,8]

$$\frac{L_b}{D} = \ln\left(\frac{D}{2\delta_0}\right) \left(We^{0.5} + 3\frac{We}{Re} \right) \quad - (1)$$

여기서 $We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma}$, $We = \frac{VD}{\nu}$

L_b : 액체 분류의 분열길이 D : 노즐 지름
 δ_0 : 초기 파동의 진폭 ρ : 액체의 밀도
 ν : 액체의 동점성계수 σ : 액체의 표면장력
 V : 액체 분류의 분사속도

이다. Weber는 실험적으로 분열길이 증가의 기울기를 나타내는 $\ln\left(\frac{D}{2\delta_0}\right)$ 의 값은 시험 유체가 물인 경우 12라고 하였으며, Grant와 Middleman^[7]에 의하면 이 값은 다음 식과 같이 Oh수로 표현된다고 한다.

$$\ln\left(\frac{D}{2\delta_0}\right) = 7.68 - 2.66 \ln(\text{Oh}) \quad - (2)$$

위의 이론을 바탕으로 이 연구의 실험 결과와 기존 연구 결과를 비교하였다.

그림5는 지름이 6mm인 노즐에 대하여 $We^{0.5} + 3\frac{We}{Re}$ 에 대한 무차원 분열길이 변화를 로그 그래프로 나타내었다. 그림5에서 $\ln\left(\frac{D}{2\delta_0}\right)$ 값은 층류 흐름 지역에서는 32이며, 난류 흐름

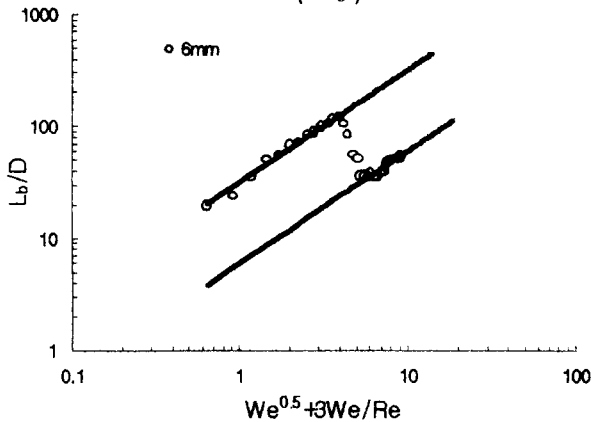


Fig. 5 Effect of $We^{0.5} + 3\frac{We}{Re}$ on normalized breakup length of tap water for nozzle diameter of 6mm ($\nu = 1.188 \times 10^{-6}$ [m²/s]).

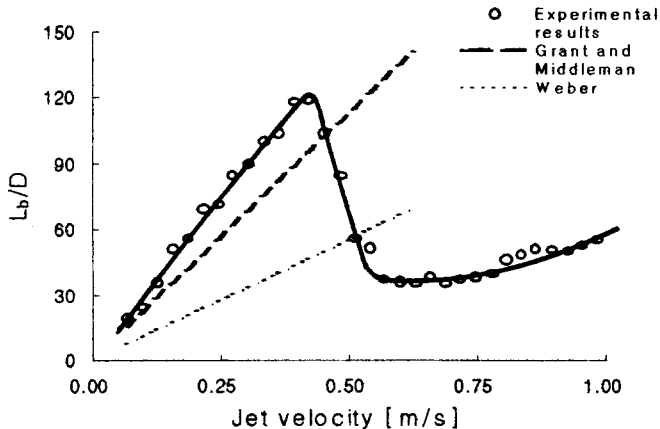


Fig. 6 Comparison of measured and predicted breakup length. ($\nu = 1.188 \times 10^{-6}$ [m²/s]).

지역에서는 6이었다. 특히 총류 흐름 지역에서는 결정계수가 0.99로 식(1)이 잘 적용되었다.

물을 유체로하여 지름이 6mm인 노즐에 대하여 Grant와 Middleman, Weber의 실험 결과를 이 연구의 결과와 비교하면 그림6과 같이 나타낼 수 있다. 본 연구의 결과는 Weber의 결과 보다는 Grant와 Middleman의 결과에 더 근접함을 알 수 있다.

4. 결론

액체 분류의 분열현상 중 하나인 점도가 분열길이에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 연구를 수행하였다. 점성유체는 물과 글리세린을 중량비로 혼합하여 동점성계수를 변화시켰다. 실험적인 변수로 노즐 지름의 크기와 점성유체의 점도를 변화시켰으며, 분열길이의 계측을 위한 영상처리 프로그램을 작성하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 물 분류의 분열길이 변화는 일반적인 분류의 안정곡선 유형을 나타내었다.
- 2) 동점성계수가 $\nu=1.188 \times 10^{-6} [m^2/s]$ 인 물의 경우 세 가지 노즐에 대해 분열길이가 최대가 되는 지점은 분사속도가 0.3~0.6m/s 이며, 이때의 레이놀즈 수는 1800~2200 이다.
- 3) 물의 경우 세 가지 노즐 모두에 대하여 Weber의 식은 총류에 잘 적용되었다.
- 4) 동점성계수, 분류속도가 증가할수록 분열길이는 거의 선형적으로 증가하였으며, 모든 동점성계수에 대하여 노즐 지름이 커질수록 분열길이의 증가 구배는 더 커진다.

5. 참고문헌

- 1) S. Leroux, C. Dumouchel and M. Ledoux, (1996) The Stability Curve of Newtonian Liquid Jets, *Atomization and Sprays*, 6 : 623~647
- 2) H. Hiroyasu, M. Arai and M. Tabata, (1986) Diesel Fuel Spray of High Viscosity Fuel, *Bulletin of the M.E.S.J.*, 14(1) : 6~15
- 3) M. Tabata, M. Arai and H. Hiroyasu, (1985) Effect of Fuel Viscosity and Surface Tension on Diesel Spray Drops, *ICLASS-85* : II B/1/1~8
- 4) D. J. Kim and C. W. Lee, (1991) Behavior of Surface Waves on the Breakup Mechanism of a Liquid Column, *ICLASS-91* : 197~204
- 5) Y. Kitamura and T. Takahashi, (1992) Atomization of Highly Viscous Liquids by a Spinning Disk, *Atomization and Sprays*, 2 : 61~71
- 6) A. Mansour and N. Chigier, (1994) Effect of Turbulence on the Stability of Liquid Jets and the Resulting Droplet Size Distributions, *Atomization and Sprays*, 4 : 583~604
- 7) R. P. Grant and S. Middleman, (1966) Newtonian Jet Stability, *Journal of A.I.Ch.E.*, 12(4) : 669~678
- 8) M. Sterling and C. A. Sleicher, (1975) The Instability of Capillary Jets, *Journal of Fluid Mech.*, 68(3) : 477~495