연료 물성에 따른 횡단 유동장 내의 액적 분열 특성에 관한 실험적 연구

김사엽* · 이근희* · 이창식†

Experimental Investigation on the Breakup Characteristics of Various Fuels in air Cross-flow Condition

Sayop Kim, Keun Hee Lee and Chang Sik Lee

Key Words: Droplet breakup(액적 분열), Breakup regime(분열 기구), Surface tension(표면장력)

Abstract

In this study, the breakup characteristics of monodisperse droplets were studied with various fuels, ethanol, diesel fuel, biodiesel fuel extracted from soybean oil, and pure water. In order to investigate the droplet behavior in air cross-flow conditions, the experimental equipment was composed of a droplet generator with an air nozzle, and a high-magnification photo detecting system. Droplets produced by the droplet generator were injected into the air stream flowing normal to a direction of liquid drop jet. Digital images of the droplet behavior in air flow field were recorded by controlling the air flow rate. From the inspections, droplet breakup mechanism is primarily classified into the two kinds of stage, first breakup stage and second breakup stage. At the first breakup stage, droplet deformation rate seems to be affected by the force induced by the surface tension and the viscosity. On the other hand, at the second breakup stage, droplet is broken up mainly induced by the surface tension, so the breakup transition can be divided by the regular Weber number.

기호설명

G : Gas phase
L : Liquid phase
U : Air velocity
ρ : Density of liquid fuel
σ : Surface tension of liquid fuel
μ : Viscosity of liquid fuel

(2007년 9월 8일 접수 ~ 2007년 9월 17일 심사완료)
†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : cslee@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0427 FAX : (02)2281-5286
*한양대학교 대학원

1. 서 론

액체 분무 기술은 자동차용 엔진의 연료 분사 시스템을 비롯한 분무 냉각, 페인팅, 산업용 연소 기기 등의 많은 산업 분야에 다양하게 활용되고 있다. 특히 자동차용 디젤 엔진에서는 연소실로 액상 연료를 직접 분사하여 자연착화 시키는 연소기구를 가지므로 연료의 분사 특성이 엔진의 연소 및 배출물 특성에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다. 즉, 연료의 미립화 정도에 따라 연료 액적의 증발률이 결정되며 이것은 연소 효율을 결정하는 중요한 요소가 되기 때문이다. 결국 공기 중에서의 액체 연료의 미립화 특성이 매우 중요한 인자가 되므로 액체 연료의 미시적 분열 기구 및 거시적 특성에 대한 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있다[1-4].

특히 횡단류 내에서의 액체 연료의 거동을 분석은 연료의 물성 및 유동 조건이 액적의 변형 및 분열의 특성,

그리고 분무 패턴에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있다. 또한 이를 바탕으로 하여 구한 실험 결과는 수치적 액적 분열 모델 및 항력 모델에 중요한 경험상수를 제공할 수 있으므로 중요한 연구 가치를 지닌다고 할 수 있다.

일반적으로 액적의 분열 기구는 크게 두개의 구간으로 나뉘어진다. 분열 기구에서 1차 분열 구간은 액적이 분열 되기 전, 항력에 의해 타원형으로의 변형을 일으키는 구간을 말하며, 2차 분열 구간은 액적이 분열하여 여러 개의 작은 액적을 만들어내는 구간을 나타낸다. 2차 분열 구간에서는 액적의 분열되는 역학적 기구에 따라 세 개의 분열 기구로 나누어지게 되는데, Liu 등[3]은 bag breakup, stretching & thinning breakup, 그리고 catastrophic breakup으로 정리한 바가 있다.

최근의 디젤 엔진에 사용되는, 기존의 화석 연료를 대체할 수 있는 바이오 디젤, 에탄올, DME 등의 연료의 미립화 특성 및 연소특성에 대한 연구 결과는 대체 연료의 연소 성능 및 배출물 저감에 크게 기여하고 있다[5-6]. 따라서 본 연구에서는 물성이 상이한 다양한 연료 조건에서의 연료 액적의 거동 및 분열 특성을 정성적, 정량적으로 분석하였다. 실험에 사용된 액체 연료로는 에탄올, 디젤유, 대두유에서 추출한 바이오디젤, 그리고 표면장력이 매우 큰 증류수를 적용하여 물성에 따른 미립화 특성을 비교 분석하였다. 특히 표면장력이 비슷한 디젤유와 바이오디젤의 비교를 통하여 점성력의 효과를, 점성계수가 비슷한 에탄올과 증류수와의 비교를 통하여 표면장력의 효과를 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에서는 연료 액적을 공기 횡단류에 수직으로 분사하여 공기와 액적의 상대속도의 변화에 따른 액적의 거동을 확인하기 위하여 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성하였다. 본 실험 장치는 크게 액적 및 공기 횡단류 생성 장치 및 고배율의 액적 사진을 취득하기 위한 광학 시스템으로 구성되어있다. 100 μm의 직경 크기를 가지는 오리피스가 포함된 액적 발생기에 일정한 진동수의 신호를 주어, 오리피스로부터 나오는 액주의 불안정성에 의하여 액적이 발생하는 원리를 이용하였다. 일정한 간격 및 크기의 액적을 만들기 위한 최적의 진동수는 Rayleigh의 불안정성 이론에 따라 식 (1)에 의하여

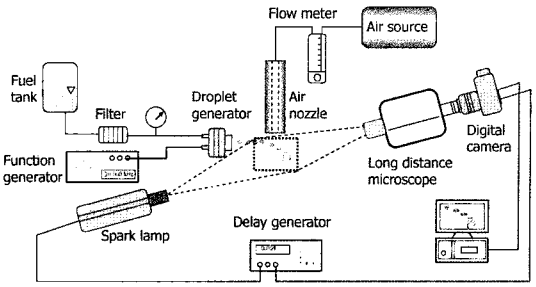


Fig. 1 Schematic diagram of droplet generating and optical systems

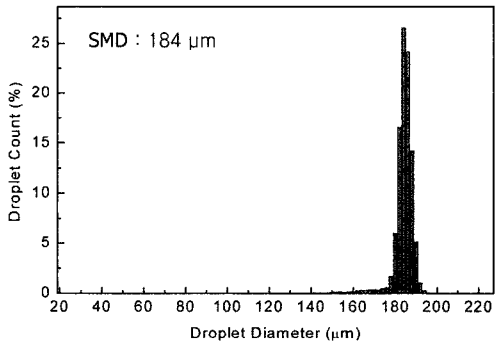


Fig. 2 Size distribution of the intact droplets

결정된다.

$$f_{opt} = 0.282\frac{Q}{D_n^3} \quad (1)$$

여기서 Q와 D_n는 각각 연료의 체적유량과 오리피스의 직경을 나타낸다. 한편, 공기 횡단류를 만들기 위한 공기 노즐은 직경 2 mm 인 원통형 노즐을 사용하였다.

2.2. 실험방법

실험에 사용된 액적의 크기는 다음의 식에 의하여 결정된다[7].

$$D = \left(\frac{6Q}{\pi f_{opt}}\right)^{1/3} \quad (2)$$

위 식으로부터 결정된 액적의 크기는 189 μm이며, 이를 검증하기 위하여 액적 발생기로부터 나오는 액적들을 PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer) 시스템을 이용하여 측정한 크기 분포를 Fig. 2에 나타내었으며 실제 184 μm의 일정한 직경으로 확인되었다.

횡단류의 속도에 따른 액적 분열을 관찰하기 위하여 공기의 유량을 1 L/min의 간격으로 3 L/min에서 50 L/

Table 1. Physical properties of test fuels

Fuels	Density (kg/m^3)	Surface tension (kg/s^2)	Viscosity (kg/ms)
Ethanol	780	0.023	0.0012
Diesel fuel	830	0.026	0.00223
biodiesel fuel	880	0.028	0.00389
Pure water	998	0.073	0.001

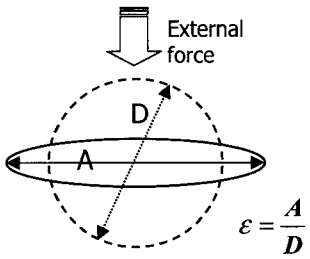


Fig. 3 Definition of droplet deformation rate

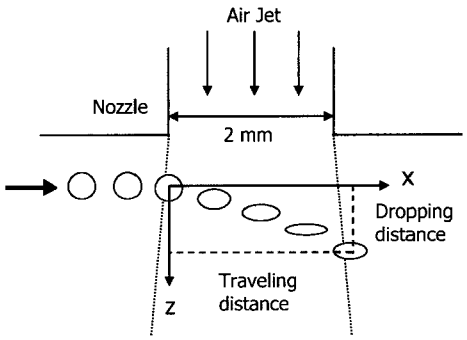


Fig. 4 Definition of droplet trajectory

min까지 조절하였으며 실제 속도는 노즐 단면적과 유량을 고려하여 환산하였다.

실험에 사용된 액체 연료는 에탄올, 디젤유, 바이오디젤, 그리고 증류수를 사용하였으며, 연료의 온도는 20℃로 유지하였다. 각 연료에 대한 주요한 물성치는 Table 1과 같다.

한편, 본 실험에서는 1차 분열 구간에서의 주요한 액적 거동인 액적의 변형율 및 궤적을 분석하기 위하여, Fig. 3, 4에 나타낸 바와 같이, 변형율은 변형된 액적의 장축의 길이에 대한 초기 액적의 지름의 비로, 궤적은 횡단유동장에 진입한 이후 액적의 수직 및 수평 방향으로의 이동거리로써 정의하였다. 그리고 액적 분열에 미치는 표면장력의 역학적 관계를 표현하기 위하여 다음과 같이 웨버 수를 정의하여 나타내었다.

$$We = \frac{\rho_G U^2 D}{\sigma_L} \tag{3}$$

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 1차 분열 구간

액적은 분열되기 전, 주변 유동장의 항력에 의하여 외력을 받게 된다. 한편, 액적 내부의 점성 유동에 의한 저항력과 표면 에너지를 유지하려는 표면 장력에 의한 저항력이 외력과 평형을 이루는 과정에서 액적의 모양이 타원형으로 변화하게 되고 이러한 구간을 1차 분열 구간이라고 한다. Fig. 5, 6에서, 1차 분열 구간에서의 액적의 변형에 대한 특성을 각각의 연료와 두 가지 유동조건에 대하여 정성적, 정량적으로 나타내었다. 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 횡단류의 유동 속도가 빨라질수록 액적의 변형량이 다소 커지는 것을 볼 수 있다. 한편, 연료의 종류에 따라 변형된 양이 각각 다른 것을 확인할 수 있는데, 이는 외력에 대하여 표면 장력 및 점성에 의한 반발력의 차이로 해석될 수 있다.

Figure 6에서 확인할 수 있는 바와 같이 변형률 곡선이 포물선 형태를 보이게 되는데, 이것은 액적이 어느 정도 변형하게 되면, 외력에 비하여 표면장력과 점성력에 의한 복원력이 커지게 되므로 다시 처음의 형태로 되돌아오려는 성질을 가지기 때문이다. 한편, 최대 변형률은 에탄올, 디젤유, 바이오디젤, 증류수의 순서로 작아지는 것을 확인할 수 있다. 특히, 점성계수가 거의 같은 에탄올과, 증류수의 결과의 비교에서는 표면장력에 의한 효과를 보여주고, 표면장력이 비슷한 디젤유와 바이오디젤의 비교에서는 점성력의 효과를 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 한 바에 따르면, 1차 분열 구간에서 점성력 및 표면장력 모두 효과적으로 액적 변형에 영향을 주는 것으로 판단된다.

한편, 1차 분열 구간에서 액적의 변형량에 따라서 횡

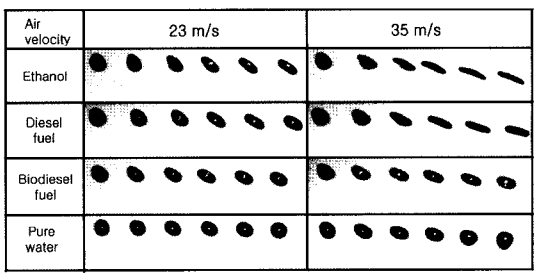
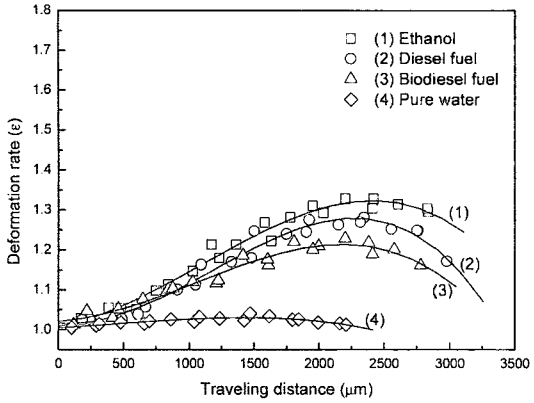
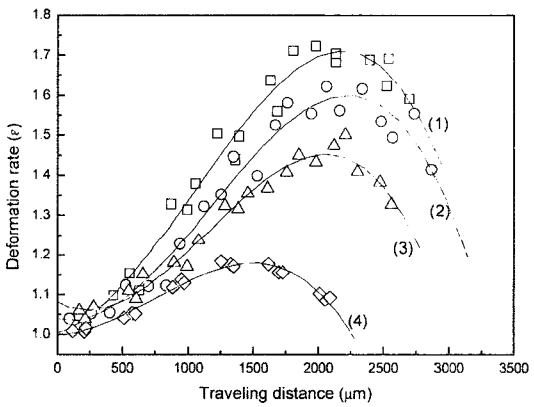


Fig. 5 Droplet behavior at the first breakup stage

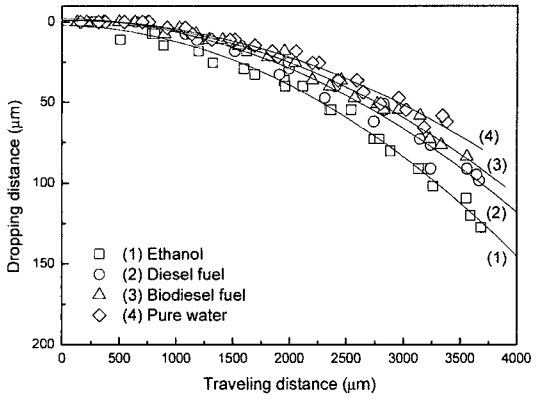


(a) Air velocity = 23 m/s

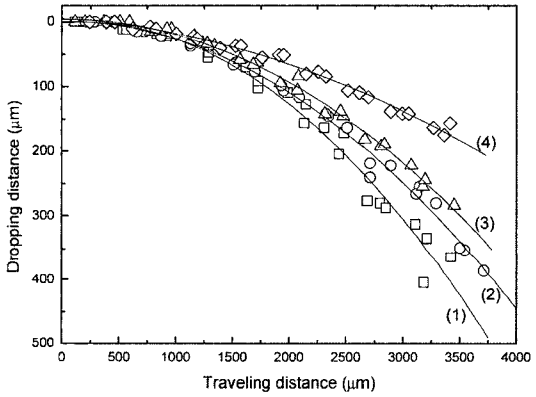


(b) Air velocity = 35 m/s

Fig. 6 Droplet deformation rate according to its traveling distance



(a) Air velocity = 23 m/s



(b) Air velocity = 35 m/s

Fig. 7 Droplet trajectory

단류에 수직 방향으로의 액적의 면적이 넓어지게되므로 액적이 받는 항력의 효과도 달라지게 된다. Fig. 7은 이러한 항력의 효과를 나타내기 위하여 실험적으로 구한 액적의 궤적을 보여주는 그림이다. 액적 궤적을 구한 결과, 에탄올, 디젤유, 바이오디젤, 증류수의 순서로 낙하거리가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이것은 Fig. 6에서의 액적 변형량과 큰 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 액적 변형량이 크면 클수록 낙하거리가 길어지는 것을 확인할 수 있는데, 결국 표면장력과 점성력이 작을수록 더 잘 변형하고, 표면적이 넓어짐으로 인해 항력의 효과가 커진 것을 확인할 수 있다.

3.3. 2차 분열 구간

액적과 주위 기체와의 상대속도가 어느 정도 이상의 값을 가지게 되면 액적은 분열하게 되고 이 구간을 2차 분열 구간이라 한다. 이 구간에서의 각 연료 액적들의 분열 기구에 대하여 실험적으로 구한 이미지를 Fig. 8에 나열하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 2차 분열 구간에서는 크게 세가지 분열 기구를 확인할 수 있었다. 첫 번째로 bag breakup의 경우, 액적이 변형 한 후 가운데 지점에서 얇은 막의 bag이 성장한 후 얇은 막이 먼저 붕괴되어 작은 액적들로 분열하는 것을 확인할 수 있다. 두 번째로, 상대속도가 더욱 증가하면 액적의 가운데 지점에서 bag이 미쳐 생성되기도 전에 가장자리의 얇은 부분이 공기 유동장에 의한 항력에 밀림으로 인해 얇은 막이 형성된다. 그리고 붕괴는 이 가장자리 부근의 얇은 막에서 먼저 일어나게 된다. 이러한 분열 기구를 stretching & thinning breakup이라고 한다. 마지막으로 상대속도가 더욱 증가하게 되면, 액적의 표면에서 불안정성 파(wave)가 생성되고, 이 파가 성장하여 파의 굴곡 부분을 중심으로 붕괴가 일어나기 시작한다. 이러한 분열 기구를 catastrophic breakup이라고 한다. 그림에서 볼

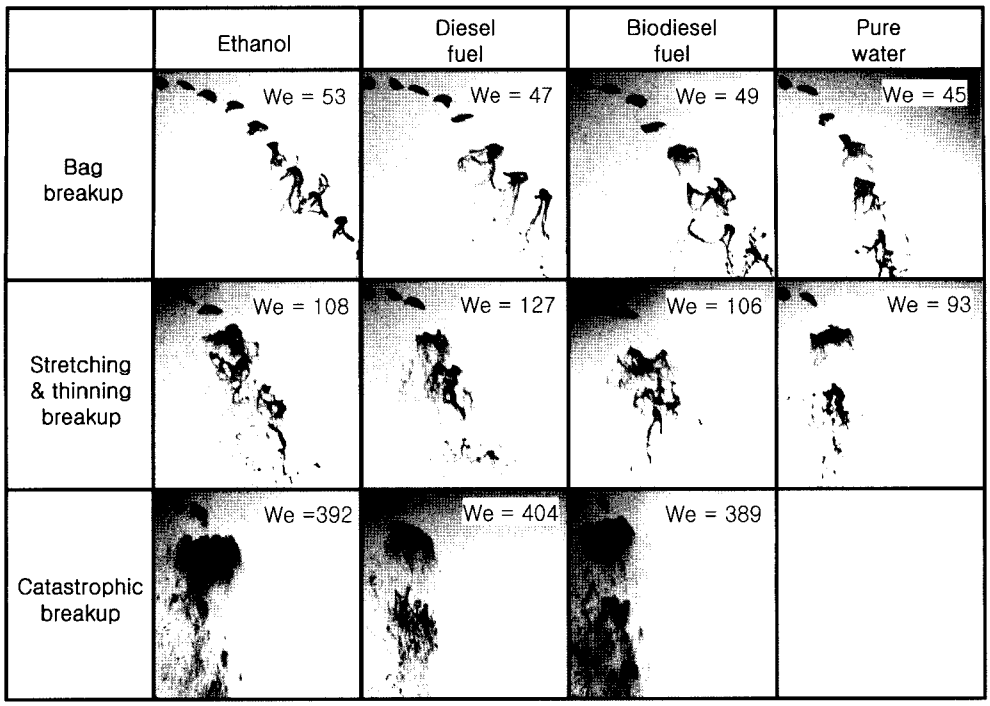


Fig. 8 Droplet breakup mechanisms at the second breakup stage

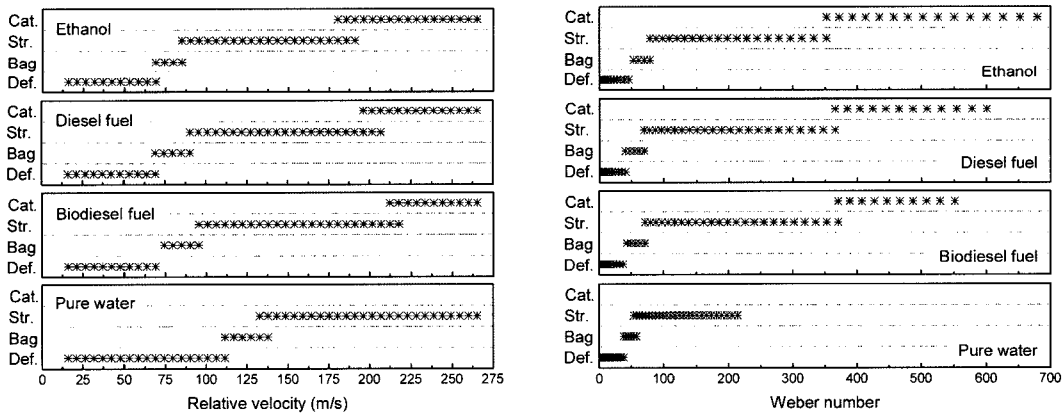


Fig. 9 Breakup regimes according to the relative velocity and Weber number

수 있는 바와 같이 연료의 종류와 상관없이 세가지 분열 기구를 공통적으로 확인할 수 있었다. 결국 연료 액적의 분열 과정은 연료의 물성과는 무관한 것으로 판단된다.

한편, Fig. 8에서 증류수의 경우에 catastrophic breakup 거동을 나타내지 않은 것은, 본 실험에서 사용된 공기 유량계의 계측 한계로 인하여 공기 속도를 265 m/s 이상 계측할 수 없었기 때문이다. 이 속도에서의 증류수에 대한 웨버 수는 214 정도이며, 이 것은 catastrophic breakup이 발생하기 위한 최소의 웨버수를 충족하지 못한다.

상대속도, 웨버 수에 대한 각 분열기구가 발생하는 구간을 Fig. 9에 나타내었다. 이 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 연료의 종류에 대하여 각 분열 기구가 일어나는 상대 속도와 영역이 다름을 확인할 수 있다. 한편, 앞서 정의한 무차원수인 웨버수로 분열 기구가 발생하는 구간을 나타낸 결과에서 볼 수 있듯이 연료의 종류와는 상관없이 웨버 수로 정의된 영역에서는 거의 일정

한 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 액적의 분열을 지배하는 가장 결정적인 연료의 물성은 표면장력인 것을 확인할 수 있다. 따라서 Lee[1]등이 정리한 바 있는 웨버 수에 따른 액적 분열 구간을 구분하는 것이 타당함을 실험적으로 입증할 수 있었다. 1차 분열 구간에서 점성력과 표면장력 모두 액적의 변형을 지배하였던 것에 비해 특이할 만한 결과이다. 2차 분열 구간에서는 액적이 분열하여 더 넓은 표면적을 만들게 되는데, 이 것은 곧 표면에너지의 상승을 의미한다. 따라서 이 표면에너지의 증가를 억제하기 위한 물성인 표면장력이 액적의 분열에 가장 지배적인 물성이 되는 이유가 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 연료 액적의 성상에 따른 횡단 공기 유동장에서의 분열 특성을 실험적으로 관찰하였고, 그 특성을 분석한 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같이 정리된다.

1) 액적과 주변 공기와의 상대속도가 증가함에 따라 연료의 종류에 무관하게 액적의 분열 과정은 크게 1차 분열 구간과 2차 분열 구간을 나뉘어지게 되며, 2차 분열 구간에서는 연료의 종류와 무관하게 공통적으로 세 가지 분열 기구를 확인할 수 있었다.

2) 1차 분열 구간에서 액적의 변형에는 표면장력과 점성력 모두 효과적으로 영향을 주는 것으로 확인되었다. 즉, 액적 내부에서의 점성 유동 저항력과 표면적이 변하는 것을 억제하려는 표면장력에 의한 저항력이 외력에 대하여 동시에 작용하기 때문이다.

3) 점성계수와 표면장력이 높은 연료일수록 액적의 변형이 억제된다. 이로 인해 유동장 방향으로의 액적의 표면적이 작아지고, 결국 공기 유동장에 의한 항력이 상대적으로 감소하여 액적의 낙하거리는 짧아지는 것을 확인할 수 있었다.

4) 2차 분열 구간에서 액적의 분열을 지배하는 무차원수는 웨버 수임을 확인하였다. 결국 액적 분열을 지배하는 가장 큰 물성은 표면장력이며, 이 것은 분열 시 표면에너지의 상승을 억제하는 속성을 가지기 때문이다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실 지원 사업 및 환경부 Eco-STAR Project (무저공해 자동차 사업단)와 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

참고문헌

(1) C. S. Lee and R. D. Retiz, "Effect of liquid properties on the breakup mechanisms of high-speed liquid drops", Atomization and Sprays, vol. 11, pp. 1-19, 2001.

(2) S. W. Park, S. Kim and C. S. Lee, "Breakup and atomization characteristics of mono-dispersed diesel droplets in a cross-flow air stream", Int. J. Multiphase Flow 32, 807~822, 2006.

(3) Z. Liu and R. D. Reitz, "An analysis of the distortion and breakup mechanisms of high speed liquid drops", Int. J. Multiphase Flow 23, 4, 631~650, 1997.

(4) S. Kim, S. W. Park and C. S. Lee, "A study on the numerical modeling of droplet breakup in an air cross-flow", ICLASS06, CD-ROM, ID-127, 2006.

(5) C. A. Sharp, S. A. Howell and J. Jobe, "The effect of biodiesel fuels on transient emissions from modern diesel engines, Part II-Regulated emissions and performances", SAE paper no. 2000-01-1967, 2000.

(6) S. H. Yoon, S. G. An, M. Y. Kim, S. I. Kwon and C. S. Lee, "Combustion characteristics of biodiesel fuel in a DI diesel engine", Fall Conference Proceedings, Vol. 1, pp. 698~704, KSAE, 2005.

(7) Y. H. Benjamin, N. B. Richard and J. K. Agarwal, "Experimental studies of optical particle counters", Atmospheric Environment, Vol. 8, pp. 717~732, 1974.