

연료 제트의 두 액적간의 충돌기구에 관한 실험적 연구

이근희* · 김사엽* · 이창식†

Experimental Investigation of Collision Mechanisms Between Binary Droplet of Fuel Jet

Keun Hee Lee, Sayop Kim and Chang Sik Lee

Key Words: Droplet collision(액적 충돌), Impact parameter(충돌 변수), Weber number(웨버수)

Abstract

In this study, the mechanisms of binary droplet collision were studied with diesel, ethanol and purified water. The droplet collisions of liquid droplet have been investigated for the same droplet diameter. In order to obtain the digital images of the droplet collision behavior, the experimental equipment was composed of the droplet generating system and the droplet visualization system. The droplets were produced by the vibrating orifice monodisperse generator. The visualization system consisted of a long distance microscope, a light source, and a high speed camera. The outcomes of binary droplet collision can be divided into four regimes, bouncing, coalescence, reflexive separation and stretching separation. The impact angle and the relative velocity of binary droplet are main parameters of collision phenomena, so the transition mechanism of droplet collision can be divided by the impact parameter.

기호설명

- B : Impact parameter
L : Liquid phase
 V_{12} : Relative velocity
 ρ_L : Density of liquid fuel
 σ_L : Surface tension of liquid fuel
 μ_L : Viscosity of liquid fuel

1. 서 론

여러 산업분야에서 널리 사용되고 있는 액체 분무 기

술은 액체 연료를 효율적으로 사용하기 위하여 중요한 역할을 한다. 또한 엔진 내에서의 연료의 분사 및 미립화 특성은 엔진의 연소 및 배출물 특성에 가장 중요한 영향을 미치는 주된 인자가 되고 있다. 이 때 액체 연료의 미립화는 주로 단일 액적의 공기역학적 분열과 두 액적간의 충돌에 의한 메커니즘에 의해 결정된다. 특히 분무형성과정에서의 액적간의 충돌은 액적의 크기 및 분무속도에 영향을 주기 때문에 액적간의 충돌거동에 대해서 심도 있게 연구할 필요가 있다. 따라서 두 액적간의 충돌에 따른 미립화 과정을 정성적으로 규명하고 액적들의 미시적 충돌 거동 특성을 분석함으로써 연료 분사 기술의 중요한 기초 자료로서 활용할 수 있으므로 액적 충돌에 관한 연구는 선행 연구자들에 의해 실험적으로 활발히 진행되어 왔다⁽¹⁻⁴⁾. 그리고 이러한 액적 충돌에 관한 연구 결과는 수치적 액적 충돌 모델의 평가에 중요한 자료를 제공하게 된다⁽⁵⁾.

선행된 많은 연구 결과에 따르면 액적 상호간의 충돌에 의하여 주로 4가지의 충돌 기구로 나누어지게 되는

(2008년 10월 9일 접수 ~ 2008년 12월 4일 심사완료)

*한양대학교 대학원 기계공학과

†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : cslee@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0427 FAX : (02)2281-5286

데, Ashgriz & Poo⁽¹⁾와 Estrade 등⁽⁶⁾은 흡착, 리플렉시브 분리, 스트레칭 분리 그리고 반발로 정리한 바가 있다. 이러한 액적 충돌 과정에서 충돌기구의 형태는 본 연구에서 진행한 실험에서도 위와 같은 4가지 분열기구를 확인 할 수 있었다. 그러나 분무 및 증발과정 등은 모두 액적 충돌에 의한 미시적 거동에 영향을 받으면서 진행되는 과정이므로 이들 충돌 특성을 분석하고 그 영향인자를 분석하는 것은 분무 및 미립화 연구에서 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 동일한 크기의 액적을 충돌시켰을 경우 증류수와 에탄올 그리고 디젤연료의 액적의 충돌 거동을 가시화하고 그 특성을 분석하였다. 또한 액적 충돌 거동은 액적간의 충돌 각도 및 충돌 상대 속도의 지배적인 영향을 받게 되므로 충돌변수와 연료의 물성이 액적의 충돌 거동에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 두 액적간의 충돌에 따른 액적들의 거동을 확인하기 위하여 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성하였다. 본 실험장치는 고배율의 액적 사진을 취득하기 위하여 고배율 마이크로스코프를 장착하였고 액적의 움직임을 연속으로 촬영하기 위하여 광원과 고속카메라 시스템을 이용하였다. 또한 90 μm 의 직경을 가지는 오리피스가 내장형 주파수 가진 액적발생기를 사용하였다.

2.2 실험방법

Table 1은 동일한 두 액적간의 충돌 후 거동을 실험하

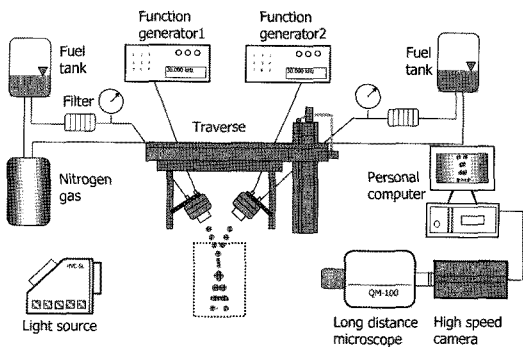


Fig. 1 Schematic diagram of droplet generating and optical systems

Table 1. Test conditions

Orifice diameter (μm)	90
Droplet size (μm)	175
Velocity of droplet	9~12 m/s
Test fuels	Purified water, Ethanol, Diesel
Drop size ratio ($\Delta=d_1/d_2$)	1
High speed camera	20,000 fps

Table 2. Physical properties of test fuels

Fuel	Density (kg/m^3)	Surface tension (kg/s^2)	Viscosity (kg/ms)
Ethanol	780	0.023	0.0012
Diesel	831	0.026	0.00223
Water	998	0.073	0.001

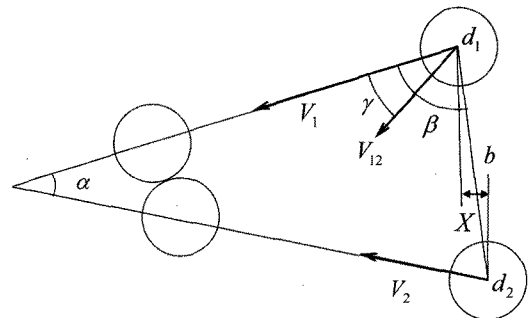


Fig. 2 Schematic of the binary droplet collision

기 위한 실험조건을 나타낸 것이다. 실험에 사용한 액체는 증류수, 에탄올, 디젤연료를 사용하였고, 액적 발생기는 90 μm 직름의 오리피스를 사용하였다. 그리고 동일한 크기의 액적을 사용하여 충돌실험을 하였다.

또한 액적의 분사 속도는 9~12 m/s로 조절하여 실험하였는데 이것은 유량 값을 1 bar로 조절하여 계산한 결과이다. 고속카메라의 이미지 취득 용량은 20,000 fps로 조절하여 액적 영상을 취득할 수 있도록 하였다.

실험에 사용된 액체 연료에 대한 주요한 물성치를 Table 2에 나타내었다.

Figure 2은 서로 다른 속도와 방향으로 진행되는 두 액적이 서로 접근하여 충돌하는 과정을 도시한 그림이다. 액적 충돌 현상은 주로 아래와 같은 주요 변수에 의

해서 결정된다. 여기서 분사속도는 유량 값을 이용하여 계산하였다.

$$We = \frac{\rho_L d_1 V_{12}^2}{\sigma_L} \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{d_1}{d_2} \quad (2)$$

$$B = \frac{2X}{d_1 + d_2} \quad (3)$$

또한 주요변수에 의해 정해지는 상대속도는 다음과 같이 정리된다

$$V_{12} = (V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2\cos\alpha)^{1/2} \quad (4)$$

여기서 V_1 과 d_1 은 큰 액적의 속도와 지름이고 V_2 과 d_2 는 작은 액적의 속도와 지름이다. 또한 Δ 는 두 액적의 지름의 비율을 나타내며, B 는 두 액적의 빗길 충돌의 정도를 나타내는 변수이다. 따라서 B 는 0과 1사이의 값을 가지며 B 가 0에 가까울수록 정면 충돌을 나타내고 1에 가까울수록 스침 충돌을 의미한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 액적 충돌 기구

액적간의 충돌이 발생할 때 액적의 충돌 기구는 액적의 상대속도와 충돌각도에 의해 결정된다. Fig. 3은 네 가지 충돌기구에 관한 물리적 메커니즘을 실험적 결과를 바탕으로 하여 도시화한 것이다. 여기서 합착(coalescence)은 두 액적의 충돌로 인하여 하나의 큰 액적으로 합쳐지는 현상을 말하며, 리플렉시브 분리(reflexive separation)는 두 개의 액적이 하나로 합쳐지는 후작의 형태를 보이다가 다시 두 개 또는 여러 개의 액적으로 나뉘어지는 현상을 말한다. 그리고 스트레칭 분리(stretching separation)는 두 액적의 일부분만이 일시적으로 합쳐진 후 다시 길게 늘어 나면서 작은 액적으로 분리되는 현상을 말한다. 마지막으로 반발(bouncing)은 두 액적이 서로 충돌한 후 액적의 표면이 깨지지 않고 충돌 방향의 반대 방향으로 튕겨져 나아가는 현상을 말한다.

Coalescence	Reflexive separation	Stretching separation	Bouncing

Fig. 3 Mechanisms of droplet collision

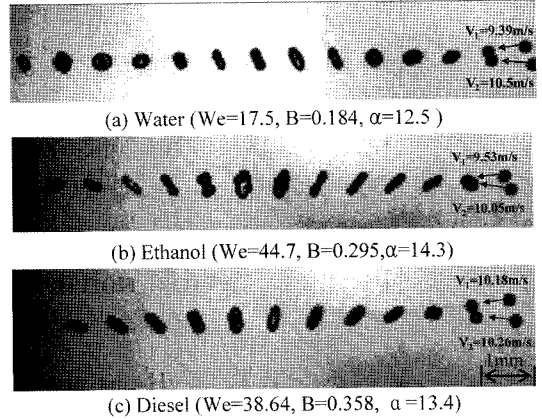


Fig. 4 Coalescence

(reflexive separation)는 두 개의 액적이 하나로 합쳐지는 후작의 형태를 보이다가 다시 두 개 또는 여러 개의 액적으로 나뉘어지는 현상을 말한다. 그리고 스트레칭 분리(stretching separation)는 두 액적의 일부분만이 일시적으로 합쳐진 후 다시 길게 늘어 나면서 작은 액적으로 분리되는 현상을 말한다. 마지막으로 반발(bouncing)은 두 액적이 서로 충돌한 후 액적의 표면이 깨지지 않고 충돌 방향의 반대 방향으로 튕겨져 나아가는 현상을 말한다.

3.1.1 합착

Figure 4에서 볼 수 있는 바와 같이 합착인 경우 두 액적이 충돌 후에 하나의 큰 액적으로 합쳐진 다음 진행방향으로 늘어난 후 다시 수평방향으로 늘어났다가 분리되지 않고 하나의 액적으로 진행하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 액적을 서로 분리 하려는 힘보다 분리 되지 않으려는 액적 내부의 복원력이 힘이 크기 때문이다. 또한 합착은 연료에 상관없이 비슷한 양상을 보인다는 것을 알 수 있었다.

3.1.2 리플렉시브 분리

Figure 5에서는 리플렉시브 분리를 확인할 수 있는데 정면충돌($B \approx 0$)에 가까울수록 액적의 분리가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 한편 리플렉시브 분리는 연료에 따라 조금 다른 양상을 확인할 수 있는데 충돌 후에 합쳐진 액적이 증류수, 디젤, 에탄올 순으로 더 빨리 분리되는 것을 볼 수 있었다. 이것은 합쳐진 두 액적이 더 넓은 표면적을 가진 후 분리하게 되는데 액적의 표면적이 넓어졌을 때 표면에너지가 상승하게 된다. 따라서 이

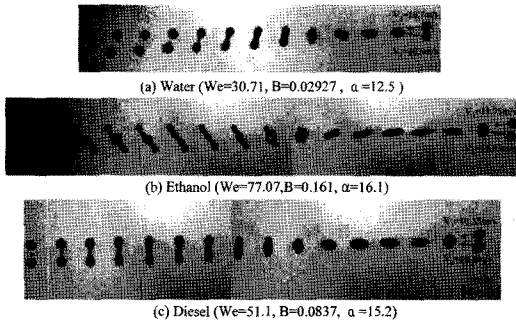


Fig. 5 Reflexive separation

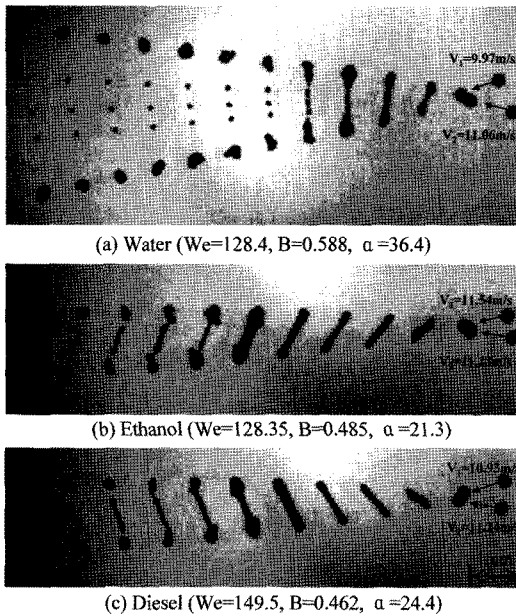


Fig. 6 Stretching separation

표면에너지의 증가를 억제하기 위한 물성인 표면장력으로 인해 액적이 다시 제 모양으로 돌아가려는 복원력이 생기게 된다. 그러므로 표면장력이 큰 연료일수록 먼저 분리되는 것을 알 수 있다. 여기서 표면장력의 크기는 물 0.073 kg/s^2 , 디젤 0.026 kg/s^2 , 에탄올 0.023 kg/s^2 이다.

3.1.3 스트레칭 분리

Figure 6에서는 위성 액적이 3개인 스트레칭 분리를 확인할 수 있다. 그림에서 보는 것과 같이 두 개의 액적이 스쳐서 충돌한 후 액적의 일부분만 합쳐졌다가 늘어나면서 두 개 또는 여러 개의 액적을 만들며 분리하는 것을 확인할 수 있었다.

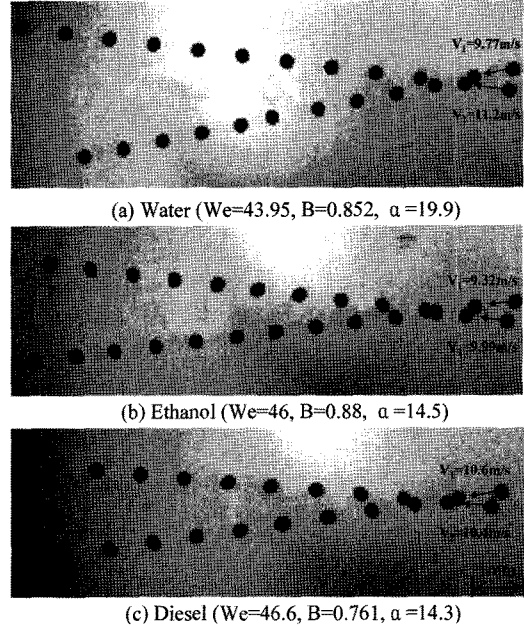


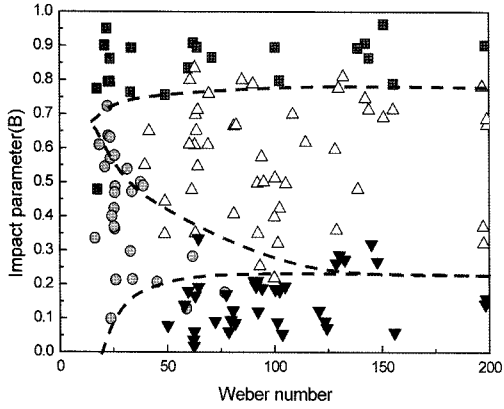
Fig. 7 Bouncing

3.1.4 반발

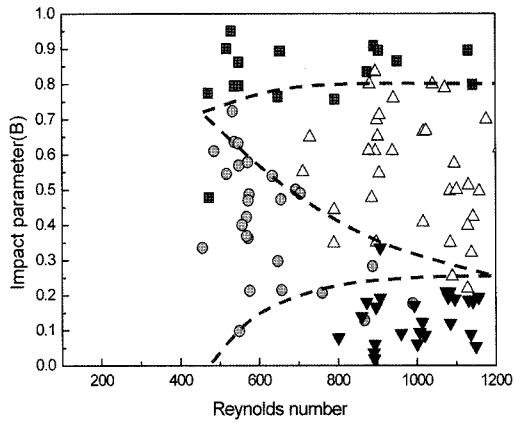
반발은 Fig. 7과 같이 액적이 서로 튕겨져 나가는 것을 볼 수 있는데 이것은 큰 충돌변수로 충돌하기 때문에 액적이 충돌하는 표면이 작아지게 되고 그러므로 액적의 표면이 깨지지 않기 때문이다. 반발의 경우 충돌변수가 1에 가깝기 때문에 두 액적간 모멘텀 교환이 활발하게 일어나지 않아 본래의 진행속도 및 진행 방향을 유지하려는 경향을 확인할 수 있었다.

3.2 액적 충돌 기구의 구간

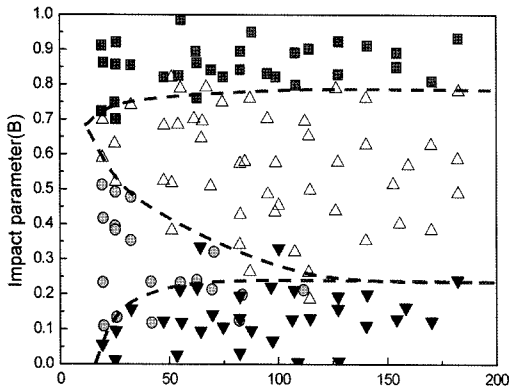
Figure 8은 충돌변수와 웨버수 영역에 따른 충돌 기구가 발생하는 영역을 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 충돌변수 B 는 두 액적의 빗길 충돌의 정도를 나타내는 변수를 말하며 충돌 후에 충돌 정도에 따라 분열기구의 형상이 변하므로 중요한 변수가 된다. 본 연구의 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 각각의 충돌 기구들은 일정한 범위 내에서 발생한다는 것을 확인할 수 있었다. 흡착은 웨버수가 70 이하의 영역과 충돌변수 0.7 이하의 영역에서 발생하는 것을 확인할 수 있었는데 주로 웨버수가 25인 영역과 낮은 충돌변수에서 흡착이 발생하는 것을 알 수 있었다. 리플렉시브 분리는 웨버수가 25 이상인 영역과 충돌변수 0.3이하의 영역에서 주로 발생하며 여기서 충돌변수는 다른 충돌 기구 중에서 가장



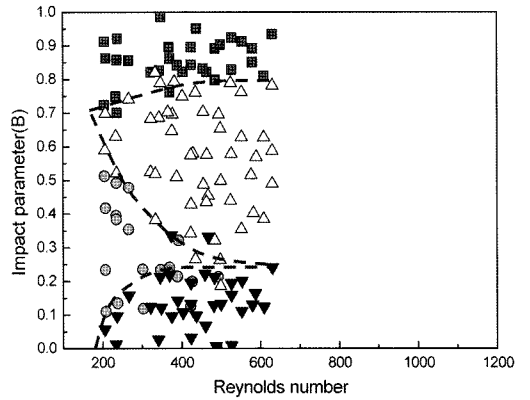
(a) Water



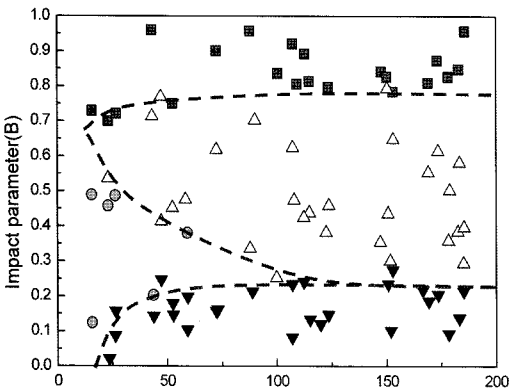
(a) Water



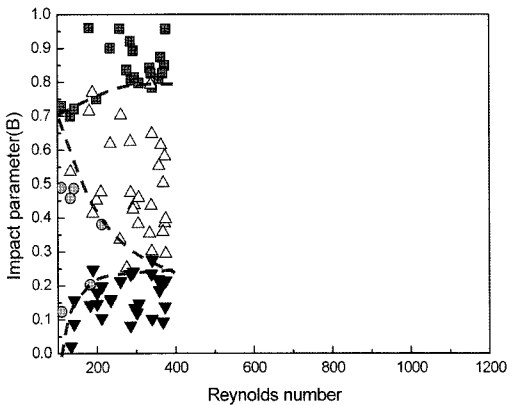
(b) Ethanol



(b) Ethanol



(c) Diesel



(c) Diesel

Fig. 8 Collision regimes according to the Weber number (■ : bouncing, △ : stretching separation, ● : coalescence, ▼ : reflexive separation)

Fig. 9 Collision regimes according to the Reynolds number (■ : bouncing, △ : stretching separation, ● : coalescence, ▼ : reflexive separation)

낮은 범위에서 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 스트레칭 분리는 웨버수가 25이상인 영역과 충돌변

수 $0.3 < B < 0.7$ 의 범위에서 주로 발생하며 다른 기구들에 비해 가장 넓은 범위에서 발생하는 것을 확인 할 수

있었다. 마지막으로 반발은 웨버수에 크게 상관없이 충돌변수에 의해서 영향을 받는 것을 확인할 수 있는데 다른 기구에 중 가장 큰 충돌변수 0.7이상인 영역에서 주로 발생 하는 것을 확인 할 수 있었다.

한편 증류수, 에탄올, 디젤의 연료를 사용하여 충돌변수와 웨버수로 충돌 기구가 발생하는 구간을 나타낸 결과에서와 같이 연료의 종류에 상관없이 웨버수로 정의된 영역에서는 거의 일정한 분포를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 액적 충돌 기구를 지배하는 가장 결정적인 연료의 물성은 표면장력임을 확인할 수 있다. 이는 두 액적간의 충돌현상이 표면적의 상쇄 및 재형성과정을 거둬하는 과정이므로 표면적을 유지하려는 표면장력의 효과가 가장 지배적으로 작용한다고 결론 지을 수 있다.

Figure 9는 충돌변수와 레이놀즈수 영역에 따른 충돌 기구가 발생하는 영역을 그래프로 나타낸 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 증류수, 에탄올, 디젤 순서로 충돌 기구가 발생하는 범위가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 연료의 물성인 점성력은 액적간의 충돌 기구가 발생하는데 상대적으로 지배적인 영향을 미치지 못하는 것으로 판단 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 연료 제트의 두 액적간의 충돌기구에 관한 실험적 연구를 통하여 액적간의 충돌 특성을 실험적으로 관찰하고, 그 특성을 분석한 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 연료제트의 두 액적간의 충돌 기구는 충돌 후에 흡착, 리플렉시브 분리, 스트레칭 분리 그리고 반발 등의 네 가지 기구가 발생함이 확인되었다.

2. 충돌변수와 무차원수인 웨버수로 충돌 기구의 발생 구간을 비교한 결과 연료의 종류에 상관없이 웨버수로 정의된 영역에서는 거의 일정한 충돌변수의 분포를 나타내는 것이 확인 되었다. 또한 웨버수에 크기에 따라서 충돌기구가 변하는 것을 볼 수 있다. 웨버수가 100이상 넘어가면 흡착을 볼 수 없었고 웨버수가 커질수록 스트레칭 영역이 커지다가 100이상이 되면 일정하게 유

지되는 것을 확인 할 수 있었다. 이 결과로부터 액적 충돌 기구를 지배하는 가장 결정적인 연료의 물성은 표면장력인 것을 확인 할 수 있었다.

3. 리플렉스 분리는 증류수, 디젤, 에탄올 순으로 더 빠르게 분리되는데 이것은 표면장력이 큰 연료일수록 먼저 분리 되는 것을 알 수 있다.

후 기

환경부 Eco-STAR Project(무·저공해 자동차 사업단)와 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) N. Ashgriz and J. Y. Poo, "Coalescence and separation in binary collisions of liquid drops", *J. Fluid Mech.*, Vol. 221, 1990, pp. 183~204.
- (2) Melissa Orme, "EXPERIMENTS ON DROPLET COLLISIONS, BOUNCE, COALESCENCE AND DISRUPTION", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 23, 1997, pp. 65~79.
- (3) Rong-Hong Chen, "Diesel-diesel and diesel-ethanol drop collisions", *Applied Thermal Engineering* 27, 2007, pp. 604~610.
- (4) J. Qian and C. K. Law, "Regime of coalescence and separation in droplet collision", *J. Fluid Mech.*, Vol. 331, 1997, pp. 59~80.
- (5) S. Kim, C. S. Lee, "A numerical study on the droplet behavior in the inter-impingement system", *KSME 08FE010*, 2008, pp. 410~415.
- (6) J.-P. Estrade, Herve Carentz, G. Lavergne, Y. Biscos, "Experimental investigation of dynamic binary collision of ethanol droplets-a model for droplet coalescence and bouncing", *International Journal of Heat and Fluid Flow* 20, 1999, pp. 486~4.