

연료 온도 변화에 따른 평판 충돌 액적의 거동에 관한 연구

이동조* · 김호영** · 정진택**

Behavior of Impinging Droplet on a Solid Surface for the Variation of Fuel Temperature

Dong Jo Lee, Ho Yong Kim and Jin Taek Chung

ABSTRACT

An experimental study on the behavior of droplets impinging on a solid flat surface was carried out in the present study. Breakup of a liquid droplet impinging on a solid surface has been investigated experimentally for various fuels with different properties. The fuel temperature and incident angle were chosen as major parameters. And fuel temperature and incident angle varied in the range from -20°C to 30°C and from 30° to 60° , respectively, were investigated.

It was found that the variation of fuel temperature influences upon droplet mean diameter which were bounced out from the solid surface. As the increases of incident angle, the break-out mass flow rate increases. This causes the decrease of liquid film flow rate. The larger incident angle gives less liquid film flow rate.

Key Words : Droplet generator(액적 발생기), Impinging droplet(충돌 액적), Incident angle(입사각), SMD(Sauter 평균입경), Volume Concentration(체적 농도), Liquid film flow rate(액막유량)

1. 서 론

현대 사회는 열효율의 극대화와 생산성의 향상을 위하여 대부분의 기관들은 단위 부피당 상대적으로 큰 발열량을 가지고 있는 액체 연료를 기본으로 채택하고 있다.

이러한 액체 연료로부터 동력을 얻기 위하여 연소기 내부로의 액체연료의 공급은 대부분 노즐을 통하여 분사 시키는 형식으로 이뤄진다.[1] 이때 분사된 액체연료의 액적은 기관의 흡기포트나 흡기밸브 등의 벽면에 충돌하게 되는데 이러한 충돌 현상은 액체 연료를 액막의 형태로 연소실 내로 유입되게 하는데 이러한 현상은 내연기관의

연소 성능과 연소과정 후 유해배출물량에 큰 영향을 미치게 되기 때문에 연료 액적의 벽면 충돌 거동에 대한 관심이 더욱 증대되고 있다.

이러한 고체 면으로의 액적의 충돌에 대한 현상은 내연기관의 분무연소, 철강 산업에서의 분무냉각, 터빈 블레이드의 냉각, 연속주조시의 열처리등 공업적으로 광범위하게 나타나고 있다. 특히 최근 자동차 산업에서는 환경문제에 대한 관심과 이에 따른 규제 강화로 인해 내연기관의 오염물질 저감과 저연비 엔진의 구현이 요구됨에 따라 연료의 미립화에 관한 연구의 중요성이 더욱 증대되고 있다.[2,3]

한편 최근 들어 소형자동차에까지 적용이 확대되고 있는 디젤 엔진은 기관의 고속화와 함께 연료의 고속분사를 요구하게 되어 결과적으로 고속 분사된 연료는 분무의 침투 깊이가 깊어지게 되어 연소실 벽면에 충돌하면서 퇴적되어 흘러내림으로써 주위 공기와의 혼합 및 연료의 증발을 어

* 고려대학교 대학원 기계공학과

† djlee5922@korea.ac.kr

** 고려대학교 기계공학과

럽게 한다.[4] 특히 추운 극지방 같은 곳의 저온 환경에서 기관의 초기 시동 시 액적은 저온의 상태로 분사하게 되는데, 따라서 이처럼 저온의 연료 액적이 기관 내부 벽면과의 충돌 시 기관의 성능에 미칠 영향에 관한 연구도 요구된다. 즉, 연료의 조악한 미립화는 연소특성에 지대한 영향을 미치기 때문에 충돌에 의한 이차적인 분열 현상과 액적의 교체면 충돌 현상에 대한 연구가 필요한 것이다.

액적충돌에 관한 지금까지의 연구를 정리해 보면 Kazushi et al.은 벽면위의 액적 충돌 시 변형 과정에서 평판에 액적이 충돌할 때 액적의 변화 과정과 가열 평판에 충돌시의 열전달 모델 그리고 액적의 증발 수명에 관한 실험적 결과와 잘 맞는 수치적 결과를 보였는데 가열평판에 충돌한 액적 안에서의 온도분포는 일반적으로 사용되어 지는 에너지 방식에 의한 것보다 일차원이나 이차원 열전도 방식에 의한 것이 더 정확함을 밝혔다.[5]

Chang et al.은 액적 충돌시의 액체의 성질과 벽면의 특성들에 의한 효과에 대해 액적의 유체역학적 거동은 점성보다는 표면장력에 의한 영향이 더 지배적임을 실험을 통하여 보였다.[6]

Pasandideh는 가열 면에 충돌한 물방울의 냉각 효과에 대해 시뮬레이션을 통해 충돌 속도는 heat flux와 접촉면의 온도변화에 매우 약한 효과를 보인다는 것을 규명하였다.[7]

Tamura et al.은 고온 면에 주사기로 여러 종류의 단일액적을 수직 자유 낙하시키는 실험에서 액적의 변화과정을 증발, 기화, 파도, 구형증발, 구형연소의 다섯 단계로 나누었다.[8]

Johnen et al.은 SI엔진의 흡기 포트에서 형성되는 연료액막의 발달과 충돌분무구조에 대한 실험을 수행하여 액막의 두께는 흡입공기의 유동과 분사되는 연료의 종류와 성질에 따라 다른 특성을 나타나게 되는데, 액적들이 벽면에 충돌하는 위치보다 흡기밸브에 가까운 위치에서 파장형태의 두꺼운 막을 이루고 있음을 보였다.[9]

앞에서 보았듯이 지금까지의 연구는 대부분이 분사액적 또는 충돌면의 온도가 상온이나 고온일 때 액적 충돌을 규명하는 것에 중점이 맞춰져 있었으며, 분사되어지는 액적이 저온인 경우에 대한 연구는 미진하다.

따라서, 본 연구에서는 분사 연료의 종류와 온도를 변화시켜가며 액적을 평판에 충돌시켰을 때, 충돌분무의 특성을 살펴보았다. 특히 연료가 저온으로 분사될 때 물성치의 변화로 인하여 나타나는 현상을 중점적으로 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 액적발생장치와 연료

본 실험에서 사용한 미립화 장치는 진동방식 단분산 분체 입자 발생기(vibrating orifice mono-disperse aerosol generator)이다. 이런 진동 방식에 의한 분무장치는 단공노즐에 의해 형성되는 액주 또는 원통형 액체 분류의 분열에 초점을 맞췄으며 노즐 출구에서 비교적 분사압력이 적은 상태에서 액주 상태로 액체가 분사되었을 때 기계적 에너지를 가하여 미립화 시키는 방법이며, 이 방법은 액주(liquid column) 또는 원통형 액체 분류(cylindrical liquid jet)의 불안정성과 분열(breakup)의 원리를 이용한 것이다.[10]

단공형 단순 미립화 장치에 의해 형성되어진 액주는 분사 압력 또는 유속이 매우 작은 경우에 노즐 출구에서 방울방울 떨어지는 적하(dripping) 현상이 나타난다. 그러나 여기서 약간의 압력이나 유속을 좀더 가해준다면 원통형 액체 분류는 제어에 힘들어져 불안정해지며 액적으로 분해되려 하는데 이러한 상태를 제어하지 않고 두면 불균일한 액적이 생기지만, 이 원통형 액체 분류에 규칙적으로 적절한 주파수의 교란을 주면 매우 균일한 액적이 발생하게 되며 분열 과정을 제어할 수 있게 되는 것이다. 그리고 주파수당 1개의 액적이 발생하게 되므로 교란의 주파수와 액체의 공급유량으로부터 1개의 액적이 갖고 있는 체적을 정확히 계산할 수 있다. 이렇게 관(Orifice)을 통해 분사되어진 원통형 액체제트의 불안정성과 분열원리를 이용한 이 방법은 Berglund-Liu[11]에 의하여 개발된 방법을 TSI사에서 개선시킨 방법이다.

본 연구에서 사용된 연료들은 등유(kerosine) 계열의 연료인 연료A와 연료B, 그리고 물이며 Fig. 2는 온도에 따른 이들의 물성치를 나타내고 있다. 실험조건의 일반성을 높이기 위해 액적 발생기와 충돌평판과의 거리는 항상 3cm로 일정하게 유지 하였으며, 액적 발생기의 오리피스 직경은 150 μ m 로 동일하게 하였다. 액적 발생기에 가하여준 교란 주파수는 물의 경우 10.0kHz, 연료A는 38.3kHz 그리고 연료B는 27.7kHz로써 입사액적이 균일하게 분열되는 주파수로 설정하였다.

2.2 연료공급장치

Fig. 3은 실험장치의 개략도이다. 연료는 진공 펌프를 이용하여 멤브레인(Membrane) 필터를 거쳐서 스테인레스 탱크에 공급된다. 질소가스에 의해 가압된 연료는 -45 $^{\circ}$ C~250 $^{\circ}$ C로 온도를 조절할 수 있는 고/저온 항온조에 장착된 열교환기를 거쳐 다시 한번 필터를 거친 후 액적발생기로

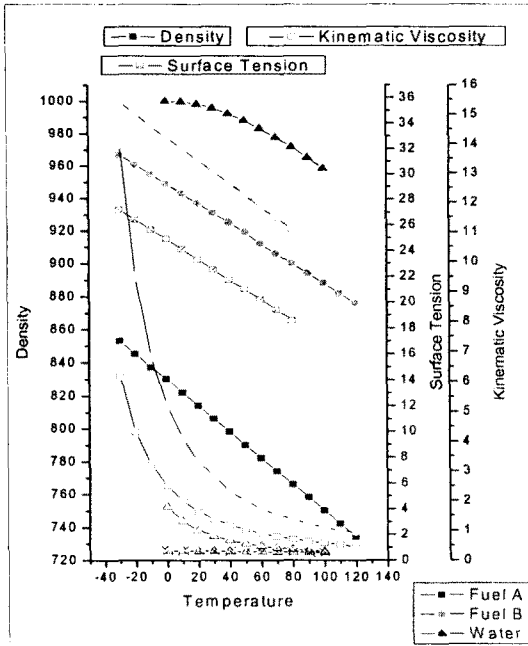


Fig. 2 The properties of Fuel A, Fuel B and Water

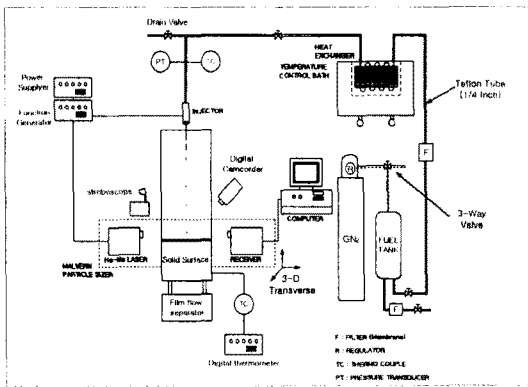


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

공급된다. 이때, 액적발생기의 입구에 압력변환기와 열전대를 장착하여 연료의 분사압력과 온도를 각각 측정하였다. 액적 발생기가 안정적으로 액적을 형성할 수 있는 압력범위 안에서 분사압력은 모두 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 하였다.

2.3 Particle Sizer

본 실험에서 액적의 평균입경측정은 Malvern Particle Sizer 2600C를 사용하였다. 이 장치는

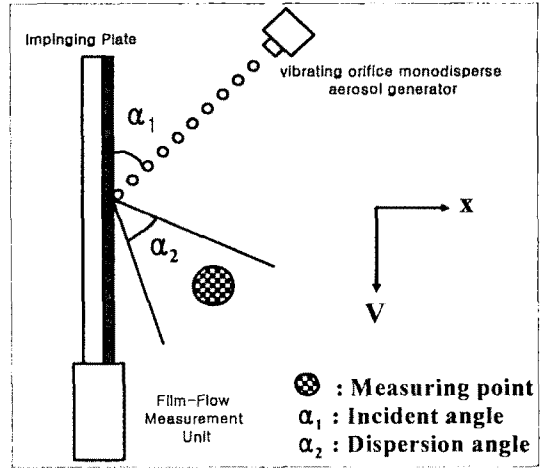


Fig. 4 Schematic diagram of incident droplet angle and dispersion angle

He-Ne 레이저를 사용하며, 빔이 구형 액적에 의해 회절 될 때 작은 액적에 의해서는 크게 회절되고 큰 액적에 의해서는 작게 회절되는 빔의 회절원리를 이용하여 입자의 크기를 측정하는 장치이다. 측정 입경범위가 $5.8\mu\text{m} \sim 564\mu\text{m}$ 인 300mm 렌즈를 사용하였다.

액적의 크기는 평판에 액적이 충돌하는 위치로부터 수평방향(x)으로 0.5cm 간격으로 측정하였고, 수직방향(V)으로는 1cm 간격으로 변화시켜가며 측정하였다. 측정은 3회씩 하였으며, 그 값들의 평균을 내어 사용하였다.

모든 실험데이터는 방해도(Obscuration) 0.01 ~ 0.5사이의 신뢰할 수 있는 값들만을 채택하였다. Fig. 4는 액적이 평판에 입사할 때에 평판과 액적이 이루는 각도인 액적 입사각 α_1 과 평판에 충돌하여 반사되어 나오는 액적들이 이루는 분산각인 α_2 를 나타내고 있다. 측정위치를 효과적으로 나타내기 위하여 충돌 점으로부터 수직 거리를 V, 수평거리를 x로 정의한다. 측정위치 M은 다음과 같다.

$$M = M(V, x)$$

2.4 Photographic apparatus

본 실험의 사진 촬영 시에 사용되어진 카메라는 Nikon사의 수동 카메라인 Nikon-FE2이며 50mm렌즈와 카메라 사이에 접사튜브(Extension tube)를 사용하였다. 스트로보스코프를 사용하여 액적발생기에서 나온 충돌 전의 액적의 정지화면을 얻을 수 있었다.



Fig. 5 Direct Photograph of uniform droplets generated by droplet generator

Fig. 5 는 물 액적의 온도가 20°C이고 액적 발생기의 오리피스 직경이 150 μ m일 때 액적발생기에서 생성된 액적들의 사진이다. 비교적 균일한 액적이 분사됨을 확인할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 6은 20°C 물을 분사시켜 충돌 시켰을 때 액적 입사각(α_1) 변화에 따른 분열현상을 나타내고 있다. 입사각이 30°, 45°, 60°로 증가함에 따라 충돌 후 분열되어 이탈되는 액적들의 분산각(α_2)이 확연하게 증가함을 볼 수 있다. 또한 액적 입사각 60°의 경우, -V방향으로도 상당량의 분열액적들이 이동하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 30°C 물을 분사할 때 α_1 을 30°, 45°, 60°로 변화시켜가며 평판에 충돌시켰을 때의 SMD와 Rosin-Rammler N 분포를 나타낸다.

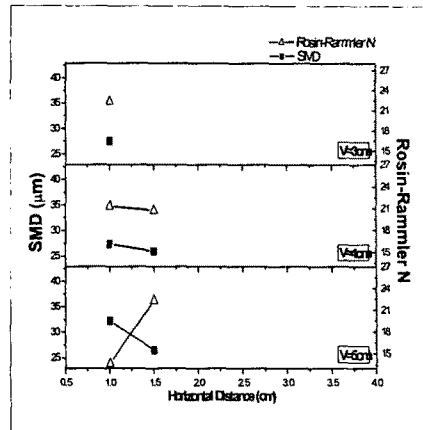
Fig. 6에서 보았듯이 입사각이 증가함에 따라 분산각이 증가하기 때문에 SMD 측정값을 얻을 수 있는 지점이 증가함을 볼 수 있다.

즉, Fig. 7 (b)와 (c)에서는 수직거리 V=0, 1, 2인 경우에도 측정값을 얻을 수 있다. 이 영역은 충돌 후 분열액적들의 주 유동 영역이기 보다는

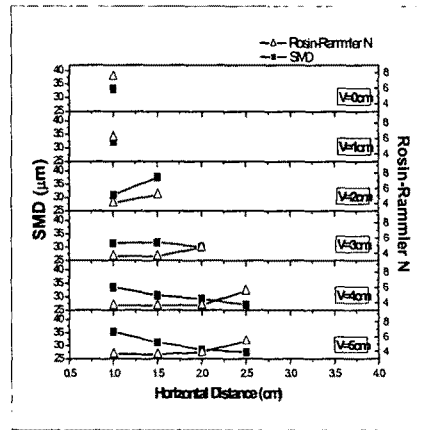


(a) $\alpha_1=30^\circ$ (b) $\alpha_1=45^\circ$ (c) $\alpha_1=60^\circ$

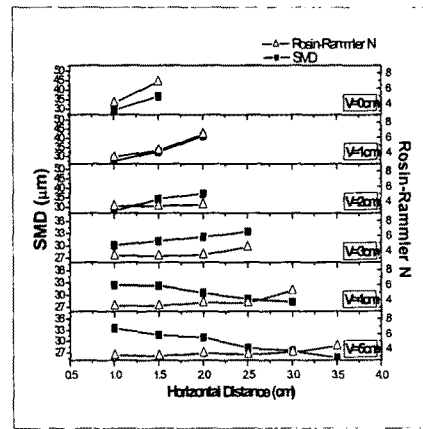
Fig. 6 Direct images of impinging droplet behavior for the variation of incident angle



(a) Incident angle=30°



(b) Incident angle=45°



(c) Incident angle=60°

Fig. 7 The effect of incident angle on the distributions of droplet mean diameter and Rosin-Rammler N (Water, fuel temperature=30°C)

충돌 후 -V 방향으로 분열되었던 액적들이 낙하하면서 측정되는 것으로 생각된다. 입사각 30°에서는 분산각이 작고, -V 방향으로 분열되는 액적의 거의 없기 때문에 처음 측정값을 얻을 수 있는 곳이 M(3,1)이고, 입사각 45°에서는 M(0,1)과 M(1,1) 지점에서만 측정값을 얻을 수 있었다. 반면에 입사각 60°에서는 M(0,1)뿐만 아니라 M(0,2)에서도 측정됨으로 앞의 분석이 타당하다고 생각한다.

Fig. 7 (c)의 V=0과 V=1 영역에서는 x 방향으로 SMD가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 주 유동 영역이 아닌 -V 방향으로 분열된 액적들 중에서 작은 액적들은 분열 후 운동량이 적기 때문에 침투깊이가 작아 평판부근에서 측정되고, 비교적 크기가 큰 액적들은 운동량이 크기 때문에 평판에서 먼 곳에서 측정되는 것으로 생각된다. 그러므로 Rosin-Rammler N 값도 x 방향으로 증가한다.

주 유동 영역의 경우 수평거리가 증가함에 따라 SMD는 감소하며, Rosin-Rammler N은 일정하다가 유동 외각에서 급격히 증가한다.

Fig. 8은 온도 30°C에서의 각 연료에 대하여 입사각 변화가 액막유량에 미치는 영향을 나타낸다.

이탈 질량유량은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{break} = \dot{m}_{initial} - \dot{m}_{film} \quad (1)$$

입사각이 증가함에 따라 벽면으로부터 이탈되어 나가는 이탈 질량유량은 증가한다. 이는 액막유량이 감소함을 의미한다. 입사각이 증가할수록 평판에 수직인 방향의 액적속도성분이 증가하기 때문에 충돌 시 액적에 미치는 반력이 증가하게 되어 액적 내부압력이 증가하게 된다. 따라서 더 많은 양의 액적들이 분열되어 나오기 때문에 액막유량은 감소하게 된다.

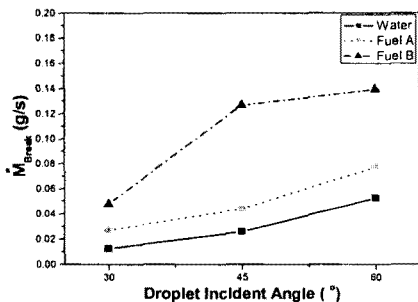


Fig. 8 The effect of incident angle on the mass flow rate of break out for various fuels (fuel temperature=30°C)

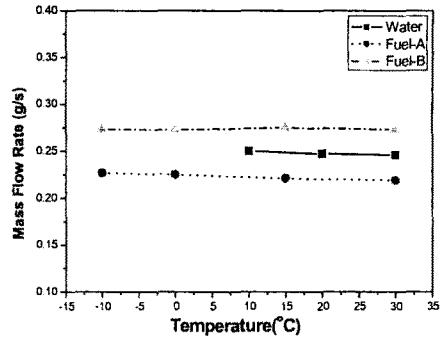


Fig. 9 The effect of fuel temperature on initial mass flow rate

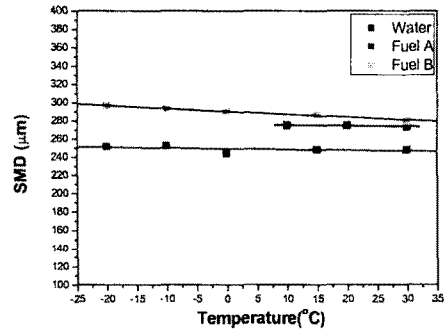


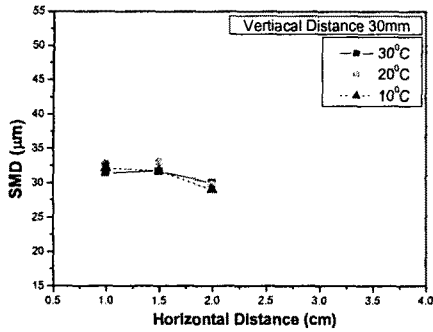
Fig. 10 The effect of fuel temperature on initial droplet mean diameter (droplet temperature=30°C)

Fig. 9는 각 연료의 온도변화에 따른 충돌 전 질량유량을 나타낸다. 온도변화와는 상관없이 세 가지 연료 모두 거의 일정한 질량유량이 분사된다.

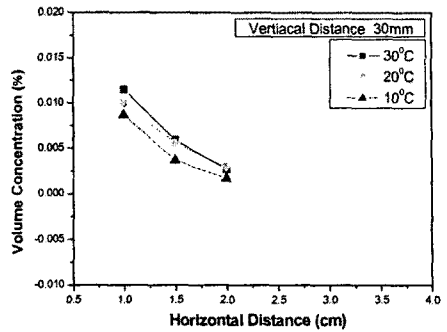
Fig. 10은 온도변화에 따른 충돌 전의 액적들의 SMD를 나타낸다. 온도가 증가함에 따라 충돌 전 액적의 크기가 약간 감소한다. 온도가 증가함에 따라 SMD가 감소하는 것은 표면장력이 감소하기 때문이다. 그러나 연료 온도변화에 의한 SMD 값의 차이가 최대 10 μm 내외로 그 영향은 매우 미미하다. 그러므로 연료의 온도변화가 SMD에 미치는 영향을 살펴 볼 때, 입사 액적의 크기 변화 영향은 무시한다.

Fig. 11은 충돌 점으로부터 수직거리 3cm에서 수평방향으로 측정된 연료 온도변화에 따른 각 연료들의 SMD 분포를 나타낸다.

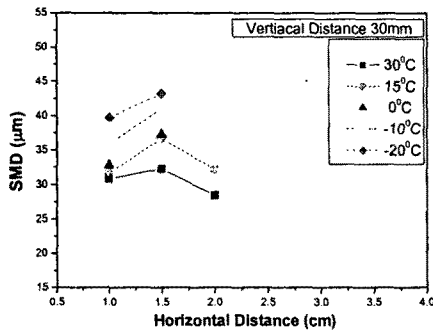
물의 경우(a), 연료 온도변화에 따른 SMD 변화는 미미하나 연료 A(b)와 연료 B(c)의 경우, 각 위치에서 연료 온도변화에 따라 SMD가 감소한다. 또한 물의 경우, 유동범위가 온도변화와는 상관없이 동일하였으나 연료 A와 연료 B의 경우 온도에 따라서 유동범위가 달라졌다. 이는 온도



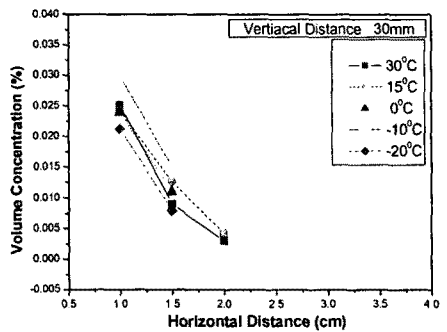
(a) Water



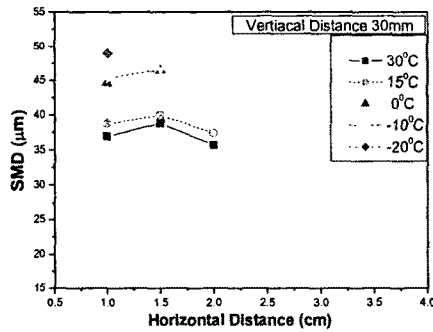
(a) Water



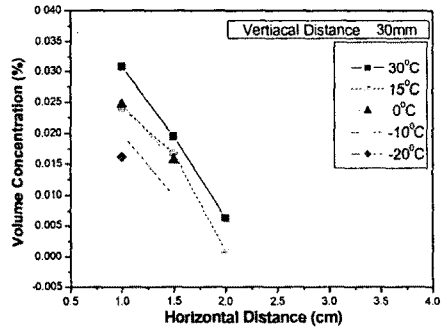
(b) Fuel A



(b) Fuel A



(c) Fuel B



(c) Fuel B

Fig. 11 The effect of fuel temperature on the distributions of droplet mean diameter for the variation of fuel ($V=3\text{cm}$, incident angle= 45°)

가 증가함에 따라 분산 각이 증가하기 때문이다.

Fig. 2에서 보는바와 같이 물의 경우, 연료 온도변화에 따른 표면장력의 변화가 미미한 반면에 연료 A와 연료 B의 경우, 연료 온도변화에 따른 표면장력의 변화가 크기 때문에 SMD 변화가 큰 것으로 생각된다.

Fig. 12는 충돌 점으로부터 수직거리 3cm에서 수평방향으로 측정 한 연료 온도변화에 따른 각

Fig. 12 The Effect of fuel temperature on the distribution of Volume Concentration for the variation of fuel ($V=3\text{cm}$, droplet incident angle= 45°)

연료들의 체적농도 분포를 나타낸다.

Fig. 12 (a), (b), (c) 모두에서 충돌지점 아래로 평판에 가까운 곳에서 가장 높은 체적농도를 보였고 이는 충돌지점 아래로 내려가면서 충돌 후 분열된 액적들이 평판에 가까운 곳에 조밀하며 평판에서 수평으로 멀어질수록 희박함을 볼 수 있다. 주 유동 방향을 설명하고 있지만 온도에 따른 체적 농도 분포 변화는 거의 없다.

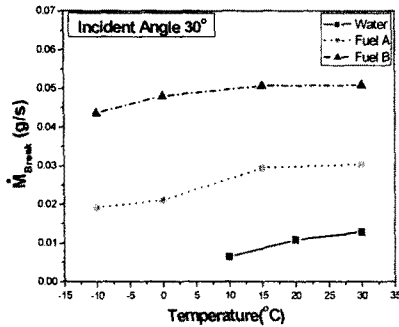


Fig. 13 The effect of fuel temperature on break-out mass flow rate for the various fuels

Fig. 13은 입사각이 30°인 경우, 연료 온도변화에 따른 각 연료의 액막유량에 대한 영향을 나타낸다.

물, 연료A 그리고 연료B의 모든 경우에 온도가 증가함에 따라 이탈 질량유량이 증가한다. 이는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 연료온도가 증가함에 따라 표면장력이 감소함으로 나타나는 현상으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 Kerosine 계열의 연료A와 연료B, 그리고 물을 이용하여 온도 변화에 따른 균일 액적의 평균 충돌 분무특성에 대해 연구를 수행하였다. 온도(-20°C~30°C)와 충돌각(30°~60°)를 변화시켜가며, 액적의 평균직경, 액막유량을 측정하였다.

본 실험의 조건과 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 액적 입사각이 증가함에 따라 충돌 후 분열되어 이탈되는 액적들의 분산각이 증가한다.
2. 액적 입사각이 증가할수록 이탈 질량유량이 증가하여 액막유량은 감소한다.
3. 연료온도가 증가함에 따라 이탈 액적의 SMD는 감소한다.
4. 연료온도가 증가함에 따라 이탈 질량유량은 증가한다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals" McGraw-Hill International Editions
- [2] Tamura and Y. Tanasawa, "Evaporation and combustion of a drop contacting with a hot surface" Seventh Symposium on Combustion, pp509-522, 19593
- [3] Lee, "Wall Impinging Behavior and Droplet Size Measurement in Diesel Spray" 1994, SAE NO. 943741
- [4] Bourke and Evers, "Fuel Film Dynamics in the Intake Port of a Fuel Injected Engine" SAE Technical Paper Series 940446
- [5] Kazushi-Trurutani, Masahiro-Yao, Jiro-Senda, Hajime-Fujimoto, "Numerical analysis of the deformation process of a drop- let impinging upon a wall" 1989, JSME International Journal
- [6] Jy-Cheng Chang, Jiu-Zhang Lu and Lian-Haw Yu, "Experimental study of the effects of fluid and wall surface properties on droplet impingement" 2001, ILASS-Asia
- [7] M. Pasandideh-Fard, "Cooling effectiveness of a water drop impinging on hot surface" 2001, International Journal of Heat and Fluid Flow
- [8] Tamura and Y. Tanasawa, "Evaporation and combustion of a drop contacting with a hot surface" Seventh Symposium on Combustion, pp509~522, 19593
- [9] T. Johnen and M. Haug, "Spray Formation Observation and Fuel Film Developments in the Intake of a Spark Ignition Engine" SAE Technical Paper Series 950511
- [10] Huimin Liu, "Science And Engineering Of Droplets Fundamental And Applications", Will- iam Andrew publishing
- [11] Berglund R. N. and B.Y.H. Liu, Generation of Monodisperse Aerosol Standards, Env. Sci. & Tech., 7; 147-152 (1973)