

유화연료 단일액적의 증발 및 연소거동에 관한 실험적 연구

김병석* · 김동일** · 오상현***

An Experimental Study on Vaporization and Combustion Behavior for Single Droplets of Water-in-Oil Emulsified Fuels

B. S. kim(Graduate School, Pusan National Univ.), D. I. Kim(Graduate School, Pusan National Univ.), S. H. Oh(Pusan National Univ.)

Key Words: micro-explosion(미소폭발), emulsified-fuels(유화연료), Combustion(연소)

ABSTRACT

An experimental study has been carried out of the combustion behavior of single fuel droplets of water-in-light oil emulsions in an electric furnace to elucidate the dominant factor for the occurrence of micro-explosions. The tests were carried out by changing the following four parameters; the size of water droplets in the emulsified fuels having the same water content, the ratio of water to light oil, ambient temperature in electric furnace, and the kind of fuel having different viscosity(Kerosene, Olive Oil). The result shows that the each parameter plays the different role in the effect on behavior of vaporization, explosion, ignition and combustion for single droplets of water-in-oil Emulsified fuels.

1. 서론

지난 수 십 년간 다양한 연소 시스템에서 유화연료(Water-in-Oil Emulsion)의 잠재적인 유용성에 많은 관심을 가져왔다. 디젤 엔진, 가스터빈, 외부 연소시스템에서 연소 효율을 개선하고 효율적인 이용을 위해서는 이제 까지 소비량이 많지 않은 고 비등점 액체 연료의 증유화 같은 저질연료의 사용이 불가피하다. 이러한 저 휘발성 액체연료가 가지고 있는 문제점은 기화가 잘 안되므로 점화가 어렵고, 연소 시 배출되는 매연량이 많다는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 액체 연료의 기화, 즉 미립화와 증발과정을 향상시켜야 한다.

액체연료의 기화를 촉진시키기 위한 하나의 방법으로 증유와 경유에 물을 혼합하여 연소하는 방법이 있다. 연소 시스템에서 유화연료의 사용은 많은 이점을 제공한다. 그중 가장 대표적인 물리적인 현상이 미소폭발(micro-explosion)이다. 이 현상은 유화연료의 액적이 가열되면서 액적속의 미세 물 액적이 과열상태(super-heated)에 이르게 되고, 그 물 액적을 둘러싸고 있는 연료에 의해 물 액적의 증발이 억제되며, 어느 순간에 폭발에 이르게 된다.

이 현상에 의해서 유화연료 액적의 2차 미립화가 이루어지게 되어, 연소효율을 향상시키게 되고, 또한 물의 증발 시 잠열에 의해 국부적인 화염온도의 저하로 인해 NOx를 저감하는 효과도 있다. 이런 현상에 대한 보다 물리적인 현상규명을 위해서 많은 연구가 선행되어 왔다. Kimoto에 의해서 연구된 뜨거운 표면 위에서의 유화 액적 증발거동연구에서는 유화연료내의 미세 물 액적 크기의 분포가 증발특성에 중요한 역할을 한다고 밝힌 바 있으며, 최근에는 실제연소 시스템을 통하여 유화연료의 연소특성을 밝히고 있다.

* 부산대 대학원
** 부산대 대학원
*** 부산대 기계공학과

본 논문에서는 보다 미시적인 접근 방법을 통해 유화연료 단일 액적의 증발거동과 연소시간에 미치는 여러 가지 요소들의 영향을 규명하고자 한다. 유화연료 액적 내의 미세 물 액적의 크기, 함수율, 분위기 온도, 연료의 점도, 이 네 가지 요소에 대한 조건변화를 주어, 유화연료의 증발과 연소에 미치는 각 요소들의 영향을 연구하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

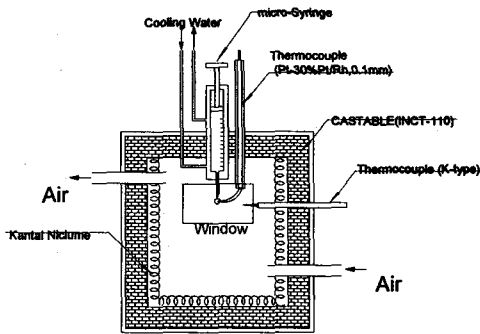


Fig. 1 Electric Furnace

Fig. 1 과 같은 전기로(가로250mm×세로250mm)를 제작하였다. 내벽에 내열재(CASTABLE)로 열손실을 막았으며, 양 측면과 바닥에 열선(Kantal Nichlume)을 끌고루 배치하여 열을 발생시켰으며, 분위기 공간은 가로120mm×세로120mm로 하였다. 액적이 착화하였을 때 산소농도를 일정하게 유지하기 위해서 압축기를 이용하여 액적 연소에 영향을 주지 않을 정도의 저속의 공기를 공급하였다. 열전대(K-type)를 설치하여 분위기 온도를 측정하고, 온도제어기를 통하여 제어하였다. 마이크로 주사기를 사용하여, 액적을 공급하였으며, 초기 액적의 반경은 $\phi 1.5\text{mm}$ 로 동일하게 하였다. 유화 액적은 미세 열전대(Pt-30%Pt/Ph, $\phi 0.1\text{mm}$)에 메달리게 되어, 고온의 분위기 온도에서 증발과 연소를 하게 된다. 유화연료가 공급되는 동안 주사위를 냉각수관으로 단열시켜 공급 액적의 가열을 막았으며, 액적이 맺히는 부분은 가로50mm, 세로50mm의 창을 내어서, 유화 액적의 증발거동을 관찰 할 수 있었다.

2.1 실험방법 및 조건

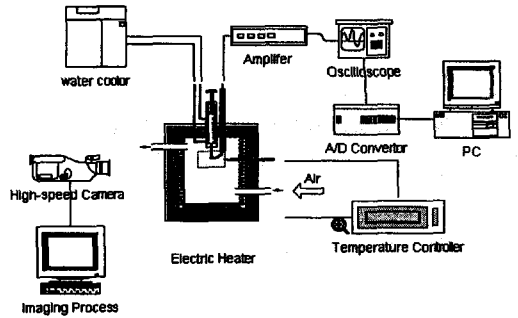


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2는 실험장치의 전체도이다. 전기로는 온도조절기를 사용하여 분위기온도를 550℃에서 800℃까지 변화시켰고, 고속카메라(1000fps)를 사용하여, 유화연료 단일 액적의 증발과 착화, 연소현상을 레코딩하였고, PC로 인터페이스하여, 이미지 프로세싱을 통하여 액적반경과 착화지연시간, 연소시간, 폭발시간을 측정할 수 있었다.

동시에, 미세 열전대(Pt-30%Pt/Rh)를 사용하여 액적 내부의 온도변화를 PC로 받아 들었다.

유화연료의 제조는 기계식 Impeller Mixer를 사용하여 2000rpm의 속도로 1시간씩 혼합하였다. 혼합후 주사위로 포집하여 마이크로 현미경을 사용하여 유화 액적 내부의 미세 물 액적 크기와 분포를 관찰하고, 촬영하였다.

실험조건은 다음과 같이 주어졌다.

Table 1. List of experimental conditions

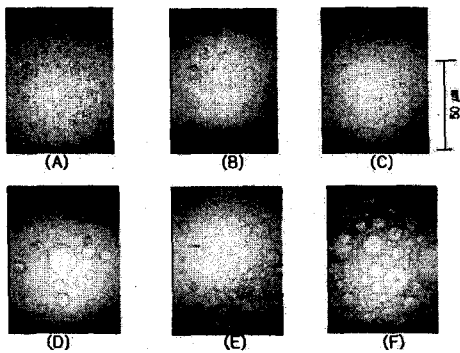
Fuel	Water content	Surfactant	Ambient Temperature
Light-Oil	10%	No	550℃ ~ 800℃
	20%	No	
	30%	No	
	40%	No	
	50%	No	
Kerosene	20%	No	600℃
Olive Oil	No	Add	

계면활성제는 첨가 시 0.5%를 첨가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유화연료 내의 물 입자크기

Fig.3은 Impeller Mixer에서 제조된 유화 연료 속의 함수율에 따른 물 입자의 크기를 현미경사 사진으로 나타낸 것이다. 유화 연료 속에 물 입자의 크기는 계면 활성제(Surfactant)를 0.5% 첨가하였을 때는 $5\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ 정도로 액적의 크기가 비교적 균일했고, 계면 활성제를 넣지 않았을 때는 $10\mu\text{m} \sim 40\mu\text{m}$ 로 다양한 액적의 크기가 존재했다. 유화연료 속에 물 입자의 크기는 연소 중에 일어나는 미소폭발(micro-explosion)에 큰 영향을 준다.



- (A) Wt-10%, Sf-0.5% (D) Wt-10%, Sf-0%
- (B) Wt-20%, Sf-0.5% (E) Wt-20%, Sf-0%
- (C) Wt-30%, Sf-0.5% (F) Wt-30%, Sf-0%

Fig. 3 Microphotographs of emulsion fuel

3.2 계면 활성제의 영향.

Fig.4는 분위기 온도 600°C 에서 함수율 20%의 유화 액적에 계면 활성제를 첨가했을 때와 첨가하지 않았을 때의 증발시간에 대한 액적 반경의 변화를 나타낸 그래프이다.

계면 활성제가 첨가되지 않은 경우 액적의 반경 변화는 아주 작으며, 1.5초대에서 미소 폭발이 일어난다. 반면, 계면 활성제가 첨가된 경우의 액적은 0.5초대에서 급격한 팽창, 즉 부품현상이 나타나게 되며, 부품현상이 끝난 후는 순수 Oil만 남아 증발하게 된다. 이는 Fig. 3의 유화 액적 내의 미세 물 액적의 크기가 액적의 증발거동에 많

은 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

계면활성제 첨가 시 미세 물 액적 크기는 작고 균일하여 과열상태(Super-heated)에 도달하여도 기화를 막고 있는 Oil의 억제력을 해체시킬 만한 폭발력을 갖지 못하게 되며, 단지 동시에 작은 물 액적들이 팽창하여 부품현상이 일어나게 되는 것이라 사려된다.

반면, 계면 활성제를 첨가하지 않은 경우 불균일한 크기의 미세 물 액적들은 Oil의 억제력을 파괴할 수 있는 충분한 크기와 폭발력을 가졌기 때문에 과열한계에 도달하게 되면 미세 폭발이 발생하는 것으로 사려된다.

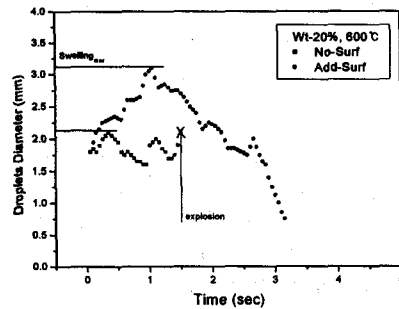


Fig. 4 Droplet diameter of No-Surf & Add-Surf

다음 그림은 유화액적의 증발 시 발생할 수 있는 대표적인 물리적 현상들을 고속 카메라 촬영을 통하여 정리한 것이다.

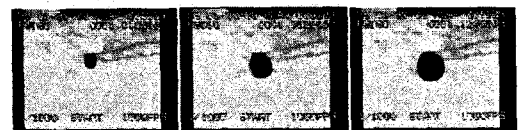
(a) 폭발(explosion)



(b) 분열(disruption)



(c) 부품(swelling)



(d) 변형(deformation)



위의 (a)폭발(explosion)과 (b)분열(disruption)은 물의 과열한계 도달 시 순간적으로 Oil의 억제력이 파괴되는 현상으로써, (a)폭발의 경우는 액적이 균일하고 아주 작은 크기의 2차 미립화를 야기 시켜므로써, 폭발과 동시에 증발이 끝나는 경우이며, (b)분열의 경우 모 액적에서 일부만이 분리되어 나가므로 분열 후에도 계속 증발이 진행된다. (c)부품(swelling)은 계면 활성제 첨가 시 나타나는 현상으로써, 미세 물 액적의 과열한계 도달 시 Oil의 억제력을 파괴하지 못하고, 서서히 팽창하여 증발하게 되는 현상이다. (d)변형(deformation)은 고 점도 연료의 유화 액적에서 주로 나타나는 현상으로 과열한계에 도달한 미세 물 액적이 충분한 폭발력을 가졌음에도 불구하고, 연료의 강한 점성을 파괴하지 못하고, 부분적인 변형만 일으키는 현상이다. 이 네 가지 현상이 유화연료 단일 액적의 증발 시 일어날 수 있는 대표적인 현상이며, 고온 분위기에서는 착화 후에도 발생하게 된다. 다음은 유화연료 단일 액적의 착화 와 착화 후에 발생하는 폭발과 분열현상을 보여주고 있다.

(e) 착화 (ignition)



(f) 착화 후 폭발 (explosion after igniting)



(g)착화 후 분열(disruption after igniting)

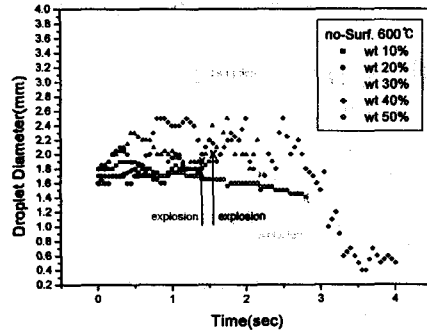


Fig. 5 Droplet diameter of Wt10%~50%, No-Sf

3.3 함수율의 영향

Fig. 5는 분위기온도 600°C에서 계면활성제를 사용하지 않고, 함수율(Water content, Wt)을 10%에서 50%까지 변화시켜 실험한 시간에 대한 액적 반경 변화를 나타낸 것이다.

함수율10%,20%,30%의 액적은 작은 반경변화를 보이다가 어느 시점에서 폭발하는 것을 알 수 있으며, 반경 변화의 폭은 함수율이 증가할수록 커지며, 폭발시기는 20%가 가장 빠른 것을 알 수 있다. 함수율40%의 액적은 큰 반경변화를 보이며, 가끔 분열이 발생하고, 폭발이 거의 일어나지 않음을 알 수 있다. 이는 함수량이 많고, 반면, Oil의 양이 적어서 Oil의 억제력이 약해지므로 물의 증발이 쉽게 일어나기 때문으로 사려된다. 함수율50%의 액적은 반경의 변화가 거의 없다가 3초대에서 폭발이 일어나게 된다.

이는 Oil이 물의 기화 억제력을 완전히 상실했기 때문에 물이 완전히 증발된 후 잔여 물 액적에 의해서 마지막에 폭발하는 것으로 사려된다.

Fig. 6은 계면 활성제 첨가 시 함수율 변화에 따른 액적 반경 변화를 나타낸 그래프이다. 함수율이 증가할수록 증발시간이 길어지는 것을 알 수 있으며, 또한 부품현상(Swelling)에 의해서 팽창된 액적의 최대 반경이 함수율30% 까지 증가하다가 40%에서 다시 감소하며 50%에서는 부품현상이 거의 일어나지 않는 것을 알 수 있다. 이는 함수율이 부품강도에 많은 영향을 준다는 사실을 알 수 있으며, Fig.5에서는 폭발강도에 대한 영향을 알 수 있다.

또한, 함수율 20%와 30%사이에 최적의 폭발조건이 존재한다고 예측된다.

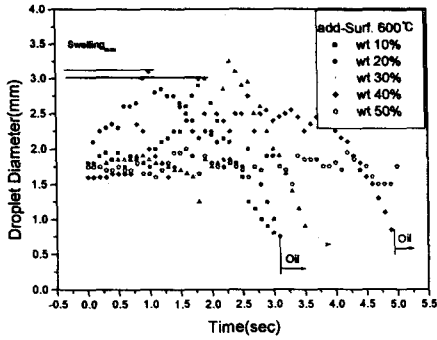


Fig. 6 Droplet diameter of Wt10%~50%,Add-Surf.

3.4 분위기 온도의 영향

Fig. 7은 계면 활성제를 첨가하지 않았을 때 함수율20%의 폭발시간(Explosion-time, τ_{exp}), 착화 지연시간(Ignition-time, τ_{ign}) 그리고, 연소 완료시간(Combustion-time, τ_{com})을 나타내고 있다. 700°C 전까지는 폭발만 일어나게 되고, 폭발시간은 분위기 온도 증가에 따라 감소하게 됨을 알 수 있으며, 700°C 이후에서는 착화가 이루어져 액적이 연소를 하게 된다. 연소 과정에서 폭발이 일어나 연소가 완료된다. 이는 700°C 이상에서는 물 액적이 과열상태가 되기 전에 Oil이 착화점에 이르게 되어 착화가 일어난 후 폭발이 발생하는 것으로 사려된다.

Fig. 8은 계면 활성제 첨가 시 함수율20%에서의 분위기 온도 변화에 따른 폭발시간, 착화 지연시간, 연소 완료시간을 나타낸 그래프이다. 650°C~700°C 사이에서 착화와 폭발, 연소가 거의 동시에 일어나는 것을 알 수 있으며, 700°C 이상부터는 착화 후 몇 번의 분열을 일으키며 연소가 진행되는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 순수 Oil과 계면 활성제를 첨가하지 않은 함수율20%의 유화 액적과 계면 활성제를 첨가한 함수율20%의 유화 액적의 연소 완료 시간은 분위기 온도 변화에 따라 나타낸 그래프이다. 가장 빠른 연소시간을 보이는 것은 계면 활성제를 첨가하지 않은 함수율20%의 유화 액적이며, 다음이 계면 활성제를 첨가한 함수율20%의 유화 액적이고, 순수 Oil이 가장 긴 연소시간을 가짐을 알 수 있다. 이는 고온 영역에서 계면 활성제 불 첨가 유화 액적은 착화 후 폭발과 동시에 연소가 완료되기 때문에 연소시간이 가장 빠

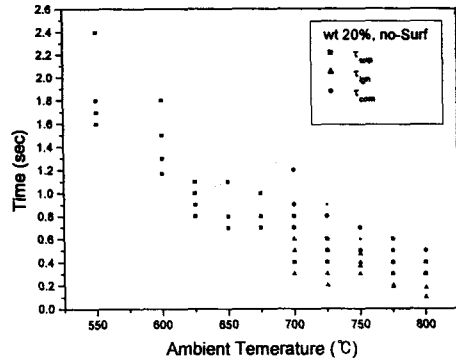


Fig. 7 Time of Exp. Ign. Comb. for Wt20%, No-Surf.

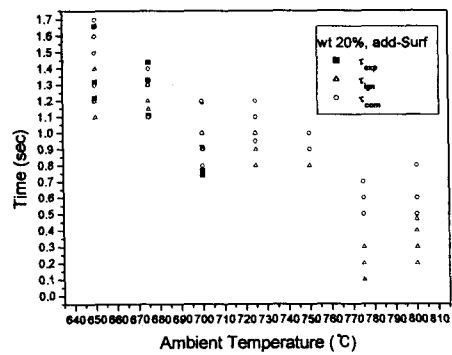


Fig. 8 Time of Exp. Ign. Comb. for Wt20%,Add-Surf.

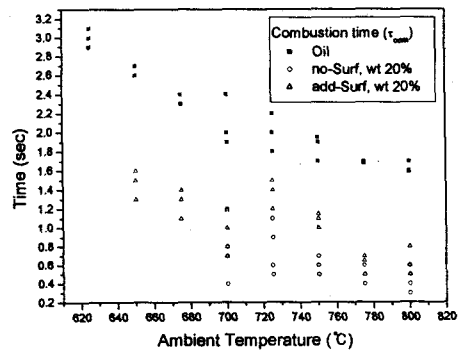


Fig. 9 Time of Comb. for Oil, Wt20% of No & Add-Surf. 르게 나타나는 것이며, 계면 활성제 첨가 유화 액적은 착화 후에도 여러 번의 분열을 반복하면서 연소가 진행되기 때문에 연소시간이 좀 더 길어진다고 사려된다.

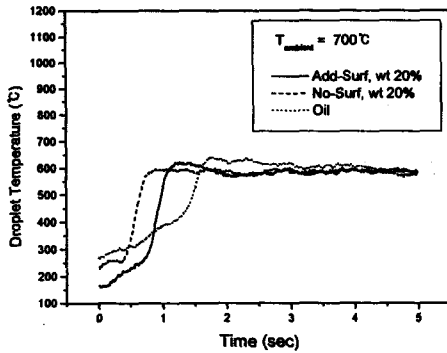


Fig.10 Temperature in Droplet for Oil, Wt 20% of No-Surf, Add-Surf.

Fig. 10은 분위기 온도 700°C에서 액적 내부의 온도 변화를 미세 열전대를 이용하여 측정한 그래프이다. 연소완료시간의 정량적인 차이를 관찰할 수 있다.

3.5 연료의 점도

분위기 온도 650°C에서 저점도 연료인 등유에 함유율20%의 유화연료 액적과 고점도 연료인 Olive Oil에 함유율20%의 유화연료 액적을 제조해서, 경유와 동일한 실험을 해본 결과 등유의 경우 몇 번의 간헐적인 분열(disruption)을 일으키면서 폭발 없이 증발하였고, Olive Oil의 경우 심한 변형(deformation)이 반복되면서, 서서히 증발하는 것을 관찰할 수 있었다.

이는 점도와 유화 액적의 미소폭발 간의 상당한 상관관계가 있음을 시사하고 있다.

과열한계에 도달한 미세 물 액적의 기화를 억제할 수 있는 연료의 점도와 물의 폭발력 사이의 힘의 균형이 유지될 때 미소폭발이 발생하는 것으로 사려된다.

4. 결론

본 연구에서 수행한 유화연료 단일 액적의 증발 및 연소거동에서 관찰된 사실은 다음과 같다.

- (1)유화연료내의 미세 물 액적의 크기와 분포는 유화 연료 액적의 증발 시 증발 형태에 영향을 미친다.

- (2)유화연료의 함유율은 유화연료 액적의 증발 시 나타나는 현상들, 즉 폭발, 분열, 부품, 변형의 강도에 영향을 미친다.
- (3)유화 연료 액적의 증발 분위기 온도는 폭발, 분열, 부품현상의 발생시점에 영향을 미친다.
- (4)유화연료에 사용되는 연료의 점도는 미소 폭발을 일으키는 중요한 요소이다.

참고문헌

- 1.Arn, S., 1973, "Burning Of Water-In-Oil Emulsions", 16th Symposium (international) on Combustion, pp. 297-305.
2. Law, C. K. Lee, C. H. and Spivivasan, N.,1980, "Combustion characteristics of water-in-oil droplets", Combustion and Flame, Vol. 37, pp. 125-143.
3. Kyoji Kimoto, 1986, "The Vaporizing Behavior of the Fuel Droplet of Water-in-Oil Emulsions on the Hot Surface", Bulletin of JSME,
4. Greeves, G., Khan, I. M. and Onion, G., 1977, "Effects of water introduction on diesel engine combustion and emissions", 16th Symposium (International) on Combustion, pp. 321-336.
5. Nazha, M. A. A., 1984, "Effect of Water Content on Pollutant Formation in a Burning Spray of Water-in-Diesel Fuel Emulsion", 20th Symposium (International) on Combustion, pp. 2001-2010.
6. 김영만, 1998, "An Experimental Study on Combustion Characteristics of Emulsion Fuel using Impeller Mixer", 추계 학술대회는문집B pp. 348-353.