

# 유화연료 단일액적의 증발 및 연소거동에 관한 실험적 연구

박민철\*, 김병석\*\*, 오상현\*\*

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

M. C. Park\*, B. S. Kim\*\*, S. H. Oh\*\*

**Key Words :** Micro-explosion(미소폭발), Emulsified-fuels(유화연료), Combustion(연소)

### Abstract

An experimental study has been carried on 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 surfactant, the ratio of water to light oil, ambient temperature in electric furnace, and four kinds of fuels having different viscosity(light-oil, kerosene, iso-octane, bunker fuel). The result shows that micro-explosion phenomena is dominated without surfactant and below 30% of water content. Explosion-time is affected by ambient temperature and viscosity of used fuel.

### 1. 서론

지난 수 십 년간 다양한 연소 시스템에서 유화연료(Water-in-Oil Emulsion)의 잠재적인 유용성에 많은 관심을 가져왔다. 디젤 엔진, 가스터빈, 외부 연소시스

템에서 연소 효율을 개선하고 효율적인 이용을 위해서는 이제 까지 소비량이 많지 않은 고 비등점 액체 연료의 중유화 같은 저질연료의 사용이 불가피하다. 이러한 저 휘발성 액체연료가 가지고 있는 문제점은 기화가 잘 안되므로 점화가 어렵고, 연소 시 배출되는 매연량이 많은 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 액체 연료의 기화, 즉 미립화와 증발과정을 향상시켜야 한다. 액체연료의 기화를 촉진시키기 위한 하나의 방법으로써 중유와 경유에 물을 혼합하여

\* 부산대 기계공학과 대학원

\*\* 부산대 기계기술연구소

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 증발시 잠열에 의해 국부적인 화염온도의 저하로 인해 NO<sub>x</sub>를 저감하는 효과도 있다. 이런 현상에 대한 보다 물리적인 현상규명을 위해서 많은 연구가 선행되어 왔다. Kimoto<sup>[5]</sup>는 뜨거운 표면 위에서의 유화 액적 증발거동연구<sup>[1]</sup>에서 유화연료 내의 미세 물 액적 크기의 분포가 증발 특성에 중요한 역할을 한다고 밝힌 바 있으며, 최근에는 실제연소 시스템을 통하여 유화연료의 연소특성을 밝히고 있다.

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 과 같은 전기로(가로250mm×세로250mm)를 제작하였다. 내벽에 내열재

(CASTABLE)로 열손실을 막았으며, 양 측면과 바닥에 열선(Kantal NiClume)을 골고루 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 mm로 동일하게 하였다. 유화 액적은 미세 열전대(PT-30%PT/Ph,  $\phi$  0.1mm)에 매단 후에, 고온의 분위기 온도에서 증발과 연소를 하게 된다. 유화연료가 공급되는 동안 주사위를 냉각수관으로 단열시켜 공급 액적의 가열을 막았으며, 액적이 맺히는 부분은 가로 50mm, 세로 50mm의 창을 내어서, 유화 액적의 증발거동을 관찰 할 수 있었다.

### 2.2 실험방법 및 조건

Fig. 2는 실험장치의 전체도 이다. 전기로는 온도 조절기를 사용하여 분위기 온도를 550℃에서 800℃까지 변화시켰고, 고속카메라(1000fps)를 사용하여 유화

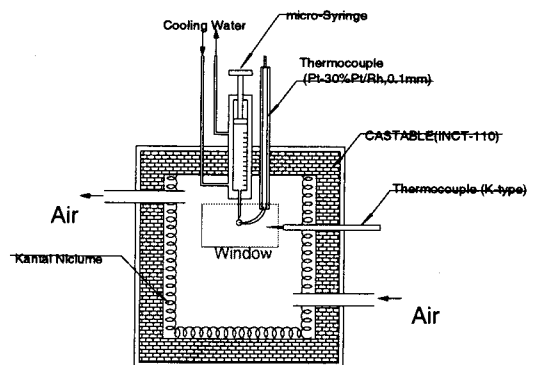


Fig. 1 Electric Furnace

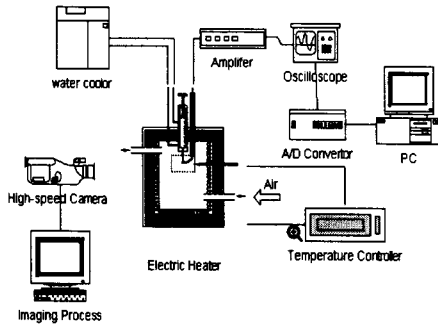


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2-1 List of experimental conditions

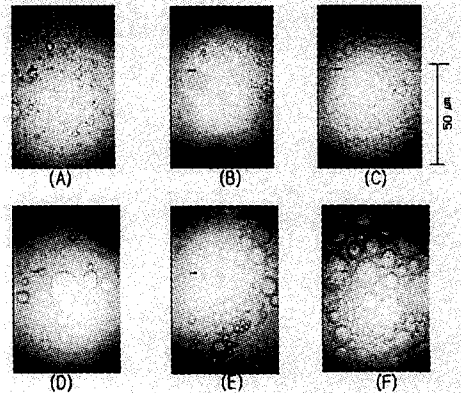
Fuel	viscosity	Water content	Surf.	Ambient Temp.
Light-Oil	4.69	10%	No Add (0.5%)	550°C ~800°C
		20%		
		30%		
		40%		
		50%		
Kerosene	1.67	20%		600°C
Isocane	6.2			
LightOil+ 벙커C유	18.47			

연료 단일 액적의 증발과 착화, 연소현상을 촬영하였고, PC로 영상데이터를 저장하여, 이미지 프로세싱을 통해 착화지연시간, 연소시간, 폭발시간을 측정할 수 있었다. 동시에, 미세 열전대 (Pt-30%Pt/Rh)를 사용하여 액적 내부의 온도변화를 계측하여 PC에 저장하였다. 유화연료의 제조는 기계식 Impeller Mixer를 사용하여 2000rpm의 속도로 1시간씩 혼합하였다.

혼합후 주사기로 포집하여 마이크로 현미경을 사용하여 유화 액적 내부의 미세 물 액적 크기와 분포를 관찰하고 촬영하였다. 단일 액적이 열전대의 영향

으로 완전한 구형을 형성하지 못한 점이 실험의 불확실성에 속한다.

실험조건은 Table 2-1과 같다.



- ( A ) W t - 1 0 % , (D) W t - 1 0 % ,  
Sf-0.5% Sf-0%
- ( B ) W t - 2 0 % , (E) W t - 2 0 % ,  
Sf-0.5% Sf-0%
- ( C ) W t - 3 0 % , (F) W t - 3 0 % ,  
Sf-0.5% Sf-0%

Fig. 3 Microphotographs of emulsion fuel

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 유화연료 내의 물 입자크기

Fig.3은 Impeller Mixer에서 제조된 유화 연료 속의 함수율에 따른 물 입자의 크기를 현미경 사진으로 나타낸 것이다. 유화 연료 속에 물 입자의 크기는 zeta potential meter로 측정하였고 계면활성제(Surfactant)를 0.5% 첨가하였을 때는 5 $\mu$ m~10 $\mu$ m정도로 액적의 크기가 비교적 균일했고, 계면활성제를 넣지 않았을 때는 10 $\mu$ m~40 $\mu$ m로 다양한 액적의 크기가 존재하였다. 유화연료 속에 물 입자의 크기는 연소 중에 일어나는 미소폭발(micro-explosion)에 큰 영향을 준다.

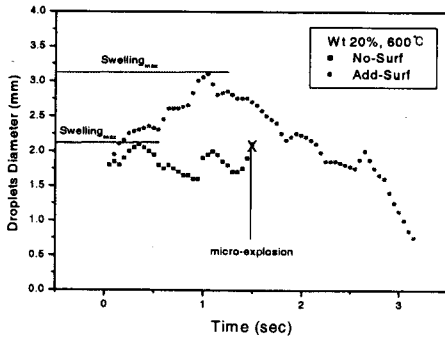


Fig. 4 Droplet diameter of No-Surf & Add-Surf

3.2 계면 활성제의 영향

Fig.4 는 분위기 온도 600°C에서 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 1초대까지 급격한 팽창, 즉 부품현상이 나타나게 되며, 부품현상이 일어나는 동안 유화액적내 미세 물 액적이 모두 증발하고 순수 Oil만 남아[1] 증발하게 되어 3초대에서 증발이 종료된다. 계면활성제를 첨가하지 않은 경우가 첨가했을 경우보다 거의 2배정도 빨리 증발이 완료된다.

계면활성제 첨가시 미세 물 액적크기는 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 사료된다.

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 발생한다. 그리고 폭발하기 전에 액적 반경의 변화가 진동을 반복하는 것은 Fig. 3에서 언급하였던 유화연료 내의 미세 물 액적의 불균일한 크기의 분포로 인하여 야기되는 현상으로 사료된다.[2]

3.3 물리적 현상

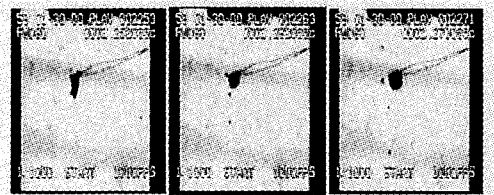
다음 그림은 유화액적 증발시 발생하는 대표적 물리적 현상들을 고속 카메라로 촬영한 것이다.

(a) 폭발현상은 액적이 아주 작은 크기의 2차 미립화를 발생시켜, 폭발과 동시에 증발이 끝나는 경우이며, 계면활성제를 첨가하지 않은 함수율 30% 이하의 조건에서 발생하게된다.

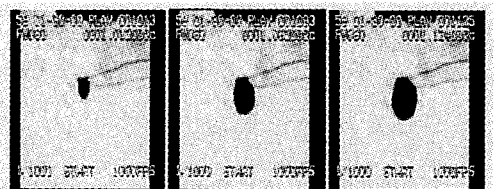
(a) 폭발(explosion. Wt 20% no-Sulf. 700 °C)



(b) 분열(disruption. Wt 40% no-Sulf. 650 °C)



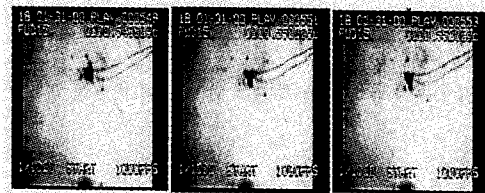
(c) 부품(swelling. Wt 40% add-Sulf. 650 °C)



(d) 착화 후 폭발 (explosion after igniting  
Wt 30% no-Sulf. 700°C)



(e) 착화 후 분열(disruption after igniting  
Wt 30% add-Sulf. 700°C)



(b) 분열현상은 모 액적에서 일부만이 분리되어 나가면서 계속 증발이 진행되며 함수율 30% 이상에서 주로 나타나는 현상이다.

(c) 부품현상은 계면 활성제 첨가 시 나타나는 현상으로서, 미세 물 액적의 과열한계 도달 시 Oil의 억제력을 파괴하지 못하고 증발하게 되는 현상이다. 이 세 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.

(d) 착화 후 폭발의 경우, 계면활성제를 첨가하지 않은 함수율 30%의 조건에서 발생하며 착화와 폭발이 거의 동시에 발생하면서 연소가 완료된다.

(e) 착화 후 분열의 경우는 계면활성제를 첨가한 함수율 30%의 조건에서 발생하는 현상으로 폭발할 때보다 연소시간이 길다.

3.4 함수율의 영향

Fig. 5는 분위기온도 600°C에서 계면활성제를 첨가하지 않고 함수율(Water content, Wt)을 10%에서 50%까지 변화시켜 실험하여 얻은 결과로서, 시간에 대한 액적 반경의 변화를 나타낸 것이다.

함수율 10%, 20%, 30%의 액적은 작은 반경변화를 보이다가 어느 시점에서 폭발하는 것을 알 수 있으며, 반경 변화의 폭은 함수율이 증가할수록 커지며, 폭발 시기는 20%가 가장 빠른 것을 알 수 있다. 함수율 40%의 액적은 큰 반경변화를 보이며, 가끔 분열이 발생하고, 폭발이 거의 일어나지 않음을 알 수 있다. 이는 함수량이 많고 Oil의 양이 적어서 Oil의 억제력이 약해지므로 물의 증발이

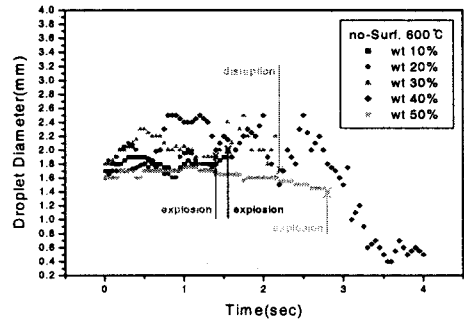


Fig. 5 Droplet diameter of Wt10%~50%, No-Surf.

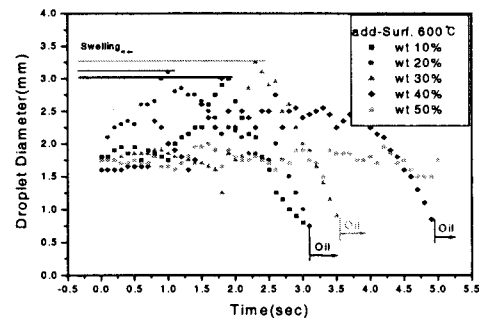


Fig. 6 Droplet diameter of Wt10%~50%, Add-Surf

쉽게 일어나기 때문에 사료된다. 함수율을 50%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 사료된다.

Fig. 6은 계면 활성제 첨가 시 함수율에 따른 액적 반경 변화를 나타낸 그래프이다. 함수율이 증가할수록 증발시간이 길어지는 것을 알 수 있으며, 또한 부푼현상(Swelling)에 의해서 팽창된 액적의 최대 반경이 함수율 30%까지 증가하다가 40%에서 다시 감소하며 50%에서는 부푼현상이 거의 일어나지 않는 것을 알 수 있다. 이는 함수율이 부푼강도에 많은 영향을 준다는 사실을 알 수 있다. 측정은 하지 못했으나 계면활성제를 첨가하지 않았을 경우는 함수율 10%보다 함수율 20%에서 폭발음이 크게 나는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 함수율이 폭발강도와 관련이 있는 것으로 생각된다.

3.5 분위기 온도의 영향

Fig. 7은 계면 활성제를 첨가하지 않았을 때 함수율 20%의 폭발시간 ( $\tau_{exp}$ ), 착화 지연시간( $\tau_{ign}$ ), 연소 완료시간( $\tau_{com}$ )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 사료된다.

Fig. 8은 계면 활성제 첨가 시 함수율

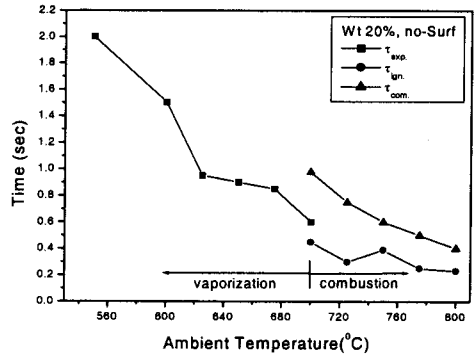


Fig. 7 Time of Exp. Ign. Comb. for Wt 20%, No-Surf.

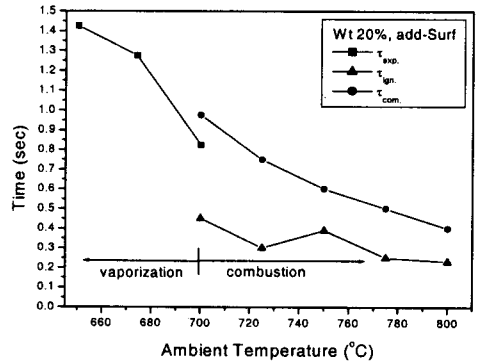


Fig. 8 Time of Exp. Ign. Comb. for Wt 20%, Add-Surf.

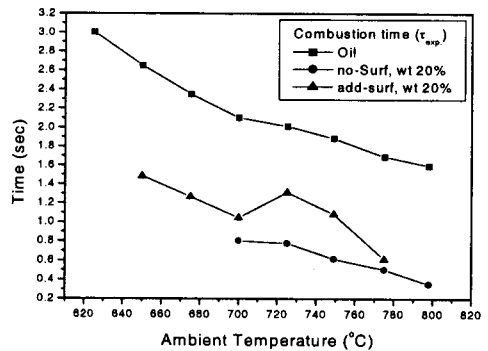


Fig. 9 Time of Comb. for Oil, Wt20% of No Add-Surf.

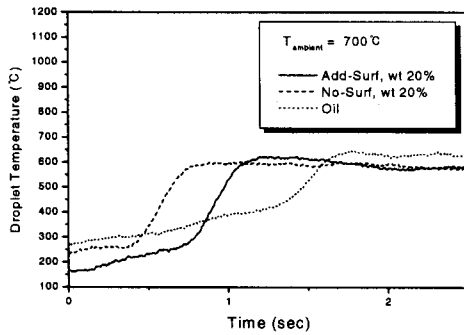


Fig.10 Temperature of Droplet for Oil, Wt 20% of No-Surf, Add-Surf.

20%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 이상에서는 착화 후 몇 번의 분열을 일으키며 연소가 진행되는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 순수 Oil과 계면 활성제를 첨가하지 않은 함수율 20%의 유화 액적과 계면 활성제를 첨가한 함수율 20%의 유화 액적의 연소 완료 시간은 분위기 온도 변화에 따라 나타낸 그래프이다. 가장 빠른 연소시간을 보이는 것은 계면 활성제를 첨가하지 않은 함수율 20%의 유화 액적이며, 다음이 계면 활성제를 첨가한 함수율 20%의 유화 액적이고, 순수 Oil이 가장 긴 연소시간을 가짐을 알 수 있다. 이는 고온 영역에서 계면 활성제를 첨가하지 않은 유화 액적은 착화 후 폭발과 동시에 연소가 완료되기 때문에 연소 시간이 가장 빠르게 나타나는 것이며, 계면 활성제를 첨가한 유화 액적은 착화 후에도 여러 번의 분열을 반복하면서 연소가 진행되기 때문에 연소 시간이 좀 더 길어진다.

Fig. 10은 분위기 온도 700°C에서 액적

내부의 온도 변화를 미세 열전대를 이용하여 측정한 그래프이다. 연소완료시간의 정량적인 차이를 관찰 할 수 있다.

### 3.6 연료의 점도

분위기 온도 600°C와 700°C에서 저 점도 연료인 등유에 함수율 20%의 유화연료 액적과 고 점도 연료인 이소옥탄과 경유에 병커C유 20%를 섞어 만든 혼합연료에 함수율 20%의 유화연료 단일 액적을 제조하여 실험을 해본 결과 등유의 경우 폭발현상 없이 여러 번의 간헐적인 분열과 부품현상을 일으키면서 증발하였다. 이는 저 점도 연료가 과열증기 상태에 도달한 물의 증발을 억제할 만큼 충분한 점도를 가지지 못하기 때문에 미세물 액적은 자연스럽게 증발하게 된다. 반면 이소옥탄과 경유+병커C유의 경우는 경유보다 더 강한 폭발소음을 일으키며 증발과 연소가 완료된다. 이는 점도와 유화 액적의 미소폭발 간의 상당한 상관관계가 있음을 시사하고 있다. 과열한계에 도달한 미세 물 액적의 기화를 억제할 수 있는 연료의 점도와 물의 기화력 사이의 힘의 균형이 유지될 때 미소폭발이 발생하는 것으로 생각된다. 미소폭발에 관해서는 다음절에서 더 자세히 살펴보기로 하자.

### 3.7 미소폭발(micro-explosion)

앞의 실험결과에서 밝혔듯이 계면활성제를 첨가하지 않았을 때 함수율 10%에서 30%사이에서는 반드시 미소폭발이 발생하게 되며, 유화 연료의 연소과정에 있어서 이 현상은 물리적으로 가장 중요한 역할을 하는 메커니즘이다. 따라서 미소폭발에 직접적인 영향을 미치는 요소들을 좀 더 상세히 접근해 보고자 한다.

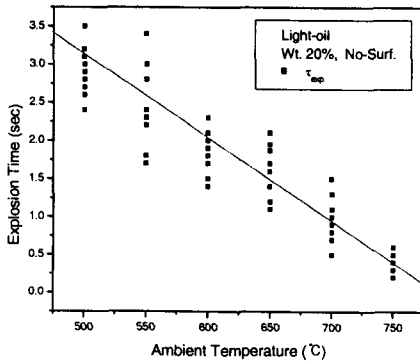


Fig. 11 Temperature in Droplet for Oil, Wt 20% of No-Surf, add-Surf

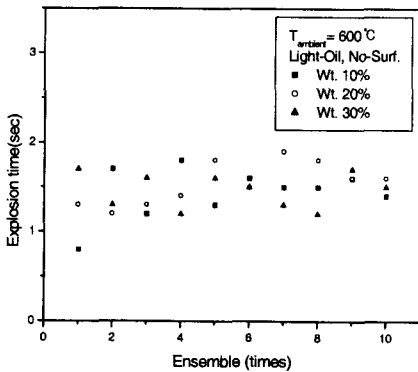


Fig. 12 Explosion time of light oil for No-surf. vs water content

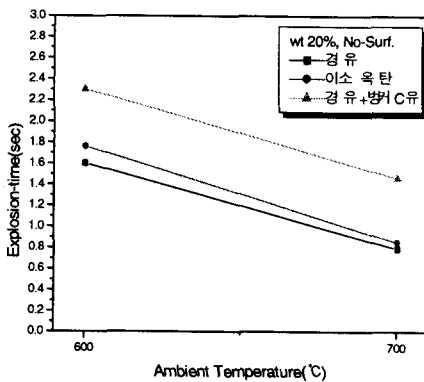


Fig. 13 Explosion time of light oil, is-octane, light oil+bunker-C

Fig. 11는 경유 함수율 20%에서 계면활성제를 첨가하지 않았을 때의 분위기 온도에 따른 미소 폭발 발생 시간을 나타낸 그래프이다. 각 온도별로 10번의 앙상블 결과 온도에 대해서 미소폭발 발생시간은 거의 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 미소폭발 발생 시간에 가장 큰 영향을 주는 것은 분위기 온도임을 알 수 있다.

Fig. 12는 경유에 계면활성제를 첨가하지 않고 분위기 온도 600°C에서 함수율 10%~30%에 따른 미소폭발 발생 시간을 나타낸 그래프이다. 각 함수율 별로 10번의 앙상블 결과 미소 폭발 발생시간은 거의 별 차이점을 발견할 수 없음을 알 수 있다. 이는 함수율은 미소폭발 발생 시간에는 큰 영향을 미치지 않는다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 13은 분위기 온도 600°C와 700°C에서 점도가 서로 다른 연료인 경유와 이소옥탄 그리고 경유 80%에 벙커C유 20%을 섞어서 만든 혼합연료를 각각 함수율 20%의 유화연료로 만들어서 실험하였을 때 미소폭발시간을 측정된 결과이며, 앙상블 10번의 데이터결과를 평균하여 나타낸 값이다. 여기서 미소폭발시간은 점도가 높은 연료를 사용할수록 느려지며 점도가 다른 연료일지라도 분위기 온도에 거의 같은 경향으로 미소폭발 시간이 짧아진다는 사실을 알 수 있다.

#### 4. 결론

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

유화연료 내의 미세 물 액적의 크기와 분포는 유화연료 액적의 증발 시 증발형태에 영향을 미치며 대표적이 험사 0 르



폭발, 분열, 부품과 같은 현상이 일어나게 된다. 또한 함수율은 폭발강도와 부품강도에 영향을 주게 된다. 이런 현상들의 발생시점에 가장 큰 영향을 주는 것은 분위기 온도이며, 유화연료에 사용되는 연료의 점도도 미소폭발을 일으키는 데 중요한 요인으로 작용한다. 특히, 미소폭발현상은 계면활성제를 섞지 않은 함수율 30%이하의 유화연료에서만 발생하게 된다. 그리고 미소폭발시간은 분위기 온도의 영향이 지배적이며 선형적인 반비례 관계를 가지며, 유화연료에 사용되는 연료의 점도는 비례적인 관계를 가지며 특정구간의 점도에서만 폭발을 일으킨다.

### 참고문헌

- (1) Suk. H. Chung and Joong S. Kim, 1990, "An experiment on vaporization and micro explosion of emulsion fuel droplets on a hot surface", 23th Symposium(international) on Combustion, pp.1431-1435.
- (2) S. R. Gollahalli, M. L. Rasmussen, and S. J. Moussavi, 1981, "Combustion Of Drops And Sprays Of NO<sub>2</sub> Diesel Oil And Its Emulsions With Water", 18th Symposium (international) on Combustion, pp 349-360
- (3) Am, S., 1973, "Burning Of Water-In-Oil Emulsions", 16th Symposium (international) on Combustion, pp. 297-305.
- (4) Law, C. K. Lee, C. H. and Spinivasan N., 1980, "Combustion characteristics on water-in-oil droplets", Combustion and Flame, Vol. 37, pp. 125-143.
- (5) Kvoni Kimoto 1986 "The Vaporizing Behavior of the Fuel Droplet of Water-in-Oil Emulsions on the Hot Surface", Bulletin of JSME.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 김영만, 1998, "An Experimental Study on Combustion Characteristics of Emulsion Fuel using Impeller Mixer", 추계학술대회논문집B pp. 348-353.