

# 물 - 경유 유화연료 액적의 연소특성에 관한연구

## Combustion Characteristics of Water-in-Oil Emulsion Droplets

정 중 수\* 신 현 동\*\*  
J. S. Jurng, H. D. Shin

### 1. 서 론

기체연료의 연소의 경우에는 연료와 산화제의 혼합, 연소라는 2 단계의 과정을 거치는데 반하여, 액체연료의 경우는 산화제와의 혼합 과정 전에 연료의 증발과정을 부가적으로 거쳐야 한다. 따라서 액체연료의 효율적인 연소를 위해서는 연료의 기화를 촉진시키기 위한 무화의 과정이 필요하다. 액체연료의 기화를 촉진시키기 위한 방법의 하나로, 액체 연료에 소량의 물을 첨가하여 유화연료(emulsified fuel)의 형태로 연소시키는 방식이 있다. 이 방법은 전체 시스템의 연소효율에는 큰 영향을 주지 않으면서 매연(soot), 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx) 및 일산화탄소(CO) 등의 공해 물질의 배출을 억제하는 것으로 보고되고 있다.<sup>1)</sup> 유화연료를 실제 연소기에 응용하는 것은 상당히 활발하고 일부에서는 상업화까지도 이루어져 있다. 그 반면, 유화연료의 연소특성에 대한 기본적인 연구는 그다지 많지 않다.

본 연구에서는 유화연료 액적의 연소 시에 나타나는 일반적인 연소특성과 이에 미치는 압력의 영향에 대하여 실험적인 방법으로 연구를 수행하였다. 고압 용기내에서 유화연료

의 단일 액적을 연소시키면서 그 연소과정을 고속으로 촬영하여 분석하는 한편, 연소과정 중의 액적 내부의 온도변화를 측정하였다. 고압 용기내의 압력은 대기압으로부터 10 atm 까지, 연료에 대한 물의 혼합비는 체적비로 0 ~ 20%까지 변화시키면서, 유화연료 액적의 연소특성에 미치는 물의 함량과 압력변화의 영향을 분석하였다.

### 2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타냈다. 실험용 고압용기는 내경이 200 mm, 길이가 300 mm인 원통형의 강제 용기로 용기의 두께는 30 mm이다. 실험장치의 전·후면에 각각 1 개씩의 조명창과 관측창을 설치하고 두께 60 mm의 아크릴을 창에 설치하였다. 실험에 사용한 유화연료 액적은 액적 공급관을 이용하여 액적 지지봉의 비이드에 형성시키고 이를 니크롬 저항선을 이용한 점화장치에 의하여 가열, 점화하였다. 액적 공급관에는 외부에서 유화연료를 공급할 수 있는 동시에, 고압 실험용기 내부에서 회전이 가능하여야 하므로, 고압으로 인한 내부 압력의 누설이 없도록 석면사를 압축하여 밀폐하였다. 액적 지지봉은

\* 한국과학기술원 기계공학연구부

\*\* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과, 부교수

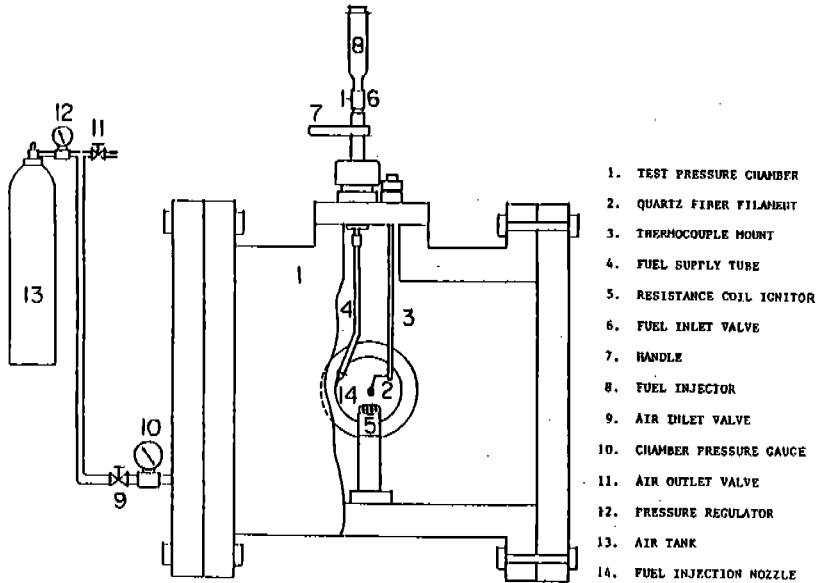


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

석영제의 “ $\Gamma$ ” 자형 봉으로 직경이 0.1mm 이고, 지지봉의 말단은 액적을 지지할 수 있게 지름 0.6mm의 구형 비이드(beed)로 되어 있다. 점화용 저항코일은 저항이 약  $10\Omega$  정도이고, 각각의 실험에서 점화에너지를 일정하게 유지할 수 있도록 방전시간 조절회로를 제작, 사용하여 방전시간을 1.15초로 일정하게 유지하였다. 점화시 저항코일로부터 공급되는 열량은 350J 정도이며, 점화용 코일의 위치는 액적 하단으로부터 약 3mm 정도로 유지하였다. 유화연료 액적의 연소현상을 고속으로 촬영하기 위하여 16mm 고속 카메라(Redlake Co., FASTAX II, Model 46-0001)를 사용하였으며, 초당 100장의 속도로 연속 촬영하였다.

액적 내부의 온도변화를 측정하기 위하여  $25.4\mu\text{m}$ 의 R형(R type, Pt-Pt/Rh 13%) 열전대를 액적의 중심부인 비이드 부근에 삽입하였다. 열전대는 그 일부가 화염대를 지나게 되므로 이에 따라 열전대선을 따른 열전도의 영향으로 측정된 온도에 오차를 가져올 가능성이 있으나, 열전대선이 충분히 가는 선이라고 생각하여 특별한 보정은 하지 않았다.

실험에 사용한 연료는 시판되고 있는 경유

로, 비등 온도의 범위는  $220\sim 360^\circ\text{C}$ 이고 연료와 물의 유화를 촉진하기 위하여 유화제(상품명 X-100)를 체적비로 2%정도 첨가하였다. 물은 증류수를 사용하고 경유와 물, 유화제의 혼합물을 자기 교반기(Magnetic Stirrer, Corning 사)로 교반하여 혼합하였다. 실험시의 액적의 초기 직경은 1.4~1.6mm로 일정하게 하였다. 이보다 액적이 큰 경우에는 착화시에 액적의 온도가 상승하면 액적이 지지봉에서 떨어지기 쉽고, 이보다 작은 액적의 경우에는 연소시 화염으로부터 지지봉을 통한 열 전달 등에 의한 비정상 효과(unsteady effect)의 영향이 커진다. 실험시에는 액적 공급관을 이용하여 액적 지지봉에 액적을 공급한 후 연료 공급관의 밸브를 닫고, 고압공기 유입밸브를 열어서 용기내의 압력을 적절하게 조정하고, 액적을 점화시켜서 실험을 수행한다.

액적의 초기직경은 독취 현미경(measuring microscope)을 사용하여 측정하고 이 측정된 초기직경 값을 기준으로 하여 고속 촬영후 인화한 사진으로부터 액적의 직경 및 화염대 거리를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 화염 형태

Photo. 1은 각 실험조건 하에서의 단일 액적의 연소상태를 촬영한 연속사진 중 비교적 준정상(quasi-steady) 연소상태에 가까운 연소 중기의 연소상태를 보여주는 사진들로 사진 하단의 숫자는 msec 단위로 나타낸 연소진행시간이다.

사진(a)~(c)는 대기압, 5 atm 및 10 atm 상태에서의 순수한 경우 액적의 연소과정을 나타내는 사진으로, 압력이 높아지면, 화염대의 위치가 액적방향으로 접근하여, 화염의 폭이 좁아지는 것을 알 수 있다. (d)는 10% 유화연료 액적을 대기압 상태에서 연소시켰을 때의 사진이고, (g)는 20% 유화연료 액적의 연소과정을 나타내는 사진이다. 유화연료 액적의 연소과정도 미세 폭발이 일어나기 전까지는 물을 혼합하지 않은 순수한 경우 연료 액적의 연소과정과 거의 차이가 없다는 사실을

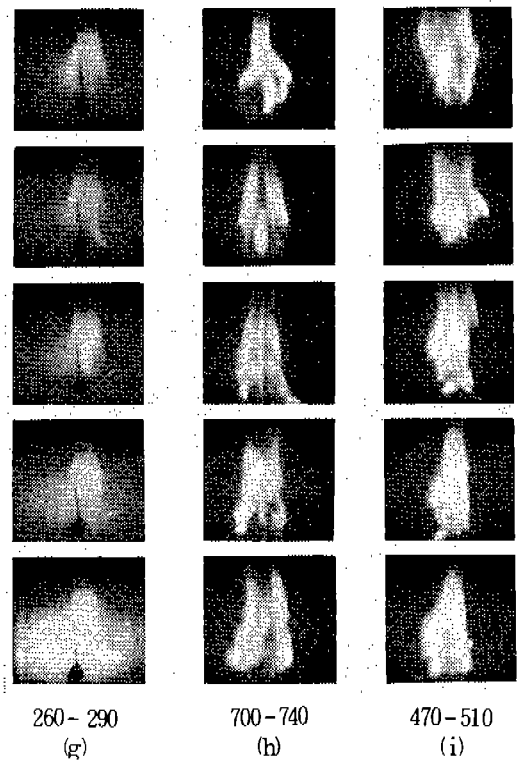
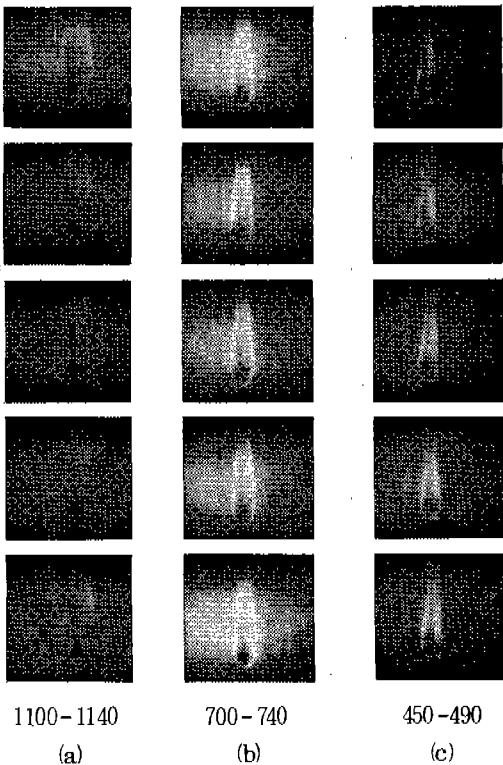
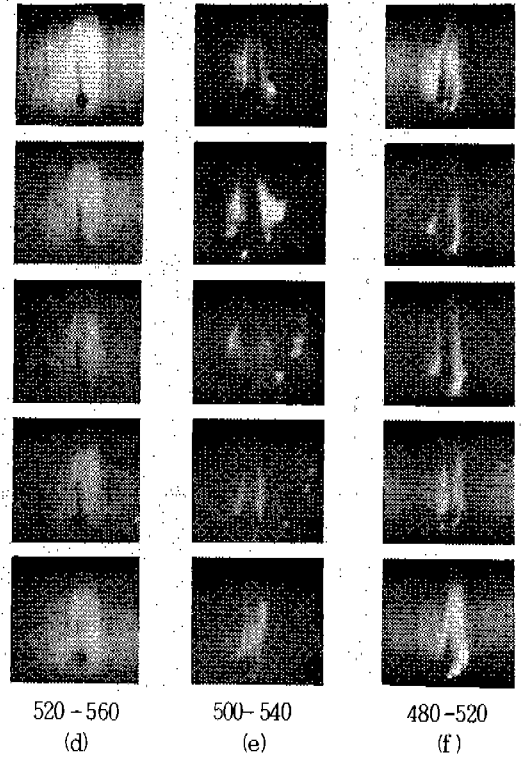


Photo. 1 Sequences of Burning Droplets

관찰하였다. 그러나, 유화연료 액적의 연소시에는 유화연료 특유의 미세 폭발(micro-explosion) 현상이 발생한다. 순수한 경유 액적의 연소시간에 대해 약 40% 정도의 시간이 경과하면, 유화연료 액적은 액적내부의 과열 증기의 팽창력에 의하여 액적 전체가 크게 폭발하여 미세한 연료 입자로 무화되고 급속히 연소반응이 진행되어 연소가 종료된다. 미세 폭발이 일어난 후 연소 종료시까지의 시간은 대략 0.01sec 정도로 전체 연소시간에 비하면 거의 순간적으로 일어난다고 할 수 있다. 미세 폭발이 일어나는 시기는 유화연료 중의 물의 함량이 변화하여도 큰 차이를 나타내지 않는다.

압력용기 내의 압력을 증가시키면, 유화연료 액적의 연소과정은 대기압 상태에서의 연소과정과는 상당히 다른 양상을 나타낸다. Photo. 1의 (e), (f), (h) 및 (i)가 각각 10%와 20% 유화연료 액적의 5atm 및 10atm의 고압상태에서의 연소상태를 보여주는 사진들이다. 고압상태에서 유화연료 액적을 연소시키는 경우에는 순수한 경유 액적을 연소시킬 때의 연소과정에서는 볼 수 없는 화염 및 액적 형태의 변동이 심하게 나타난다. 대기압 상태에서의 유화연료 액적의 연소시에 관찰할 수 있었던 미세 폭발현상은 나타나지 않는다. 그 대신에 부분 미세 폭발(partial micro-explosion)이라고 할 수 있는 유화연료 액적의 표면으로부터의 미세한 쪼개짐 현상이 연소중기 이후 나타나기 때문에 화염과 액적 형태의 변동이 계속 일어나는데, 이러한 변동은 물의 함량이 커지면 강도가 커지고, 압력이 증가하면 약간 억제되는 경향을 나타낸다.

한편, 다성분계 연료(multicomponent fuel)를 사용하면 물을 섞지 않은 순수한 연료만의 연소시에도 부분 미세 폭발현상과 유사한 분열연소(disruptive burning) 현상이 일어날 가능성이 있다. 그러나, 본 연구에서와 같이 경유를 사용하는 경우에는 물을 섞은 유화 연료 액적의 경우에 비해 미세 폭발의 강도를 결정하게 되는 각 성분(component) 사이의 중발 온도차가 상대적으로 크지 않아서 분열 연소

의 강도가 크지 않으며, 본 연구에서는 순수한 연료만의 액적의 연소시에는 분열 연소현상은 관찰되지 않았다. 참고로 본 연구실에서 경유 대신에 벙커C유를 사용하여 유사한 실험을 수행한 결과 물을 섞지 않은 경우에도 상당히 강한 분열 연소현상을 관찰할 수 있었다.

### 3.2 화염대 거리에 대한 압력의 영향

액적의 연소과정 중에 액적의 표면으로부터 화염까지의 거리를 화염대 거리(flame-stand-off distance)라고 하며, 화염대 거리의 값은 대체로 연소중 시간에 따라 거의 변하지 않으며, 주위 압력만의 함수라고 알려져 있다.<sup>5)</sup> 그러나 Fig. 2에서 보면 실험결과 측정된 화염대 거리는 시간에 따라 약간 변화하며, 대체로 주위압력과 연료의 종류에 무관하게 연소초기에는 작고 연소중기에 증가하였다가 다시 연소의 후기에 감소하는 유사한 형태를 나타낸다. 이 그림의 (a), (b) 및 (c)는 각각 순수한 경유 액적, 10% 및 20% 유화연료 액적을 대기압, 5atm 및 10atm 상태에서 연소시킨 결과를 나타내고 있다. 압력이 증가하면 화염대 거리가 작아지고 화염이 액적 쪽으로 접근한다. 특히, 순수한 경유 액적 연소시에는 압력의 증가에 의한 영향이 매우 크고, 압력이 10atm이 되면 화염대 거리는 평균 1/4 정도로 작아지는 것을 알 수 있다. 유화연료 액적의 경우에는 고압상태에서는 연소의 중기

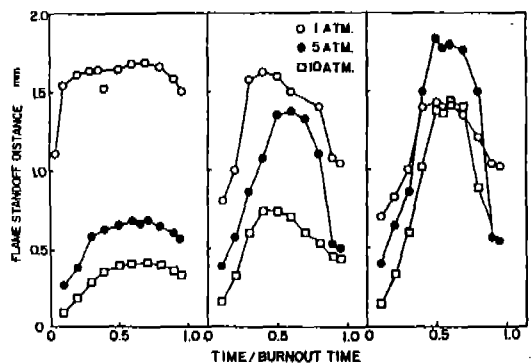


Fig. 2 Variations of Flame-Standoff-Distance  
(a) Pure Diesel fuel (b) 10% W/O  
(c) 20% W/O

이후에 부분 미세 폭발현상이 계속적으로 진행되고 있으므로 화염대 거리의 변동이 매우 심하며, 압력의 증가에 따른 영향은 연소 초기 및 말기에만 발견된다. 특히, 20% 유화연료 액적의 연소과정에는 부분 미세 폭발현상에 의한 화염의 형상의 변화가 매우 심하므로, 주위압력을 변화시켜도 화염대 위치가 액적 표면 쪽으로 접근하는 것을 관찰하기 어렵다.

한편, 연료중의 물의 함량이 변화하면, 증발속도가 영향을 받게 되므로, 연소속도도 약간 영향을 받는다. 대기압 상태에서의 연소시의 결과를 비교하면, 물의 혼합비가 증가함에 따라 화염대 거리가 약간씩 감소하는 것이 관찰되는데 그 정도가 뚜렷하지는 않다. 또, 유화연료 액적을 고압 상태에서 연소시키는 경우에는 부분 미세 폭발의 영향으로 화염대 거리가 전체적으로 증가하므로 이러한 경향을 관찰할 수 없다.

여기서 나타낸 화염대 거리는, 현가 액적(suspended droplet) 실험의 특성상 화염과 액적의 형태가 구형 비대칭성을 가져서 하나로 정의하기 어려우므로, 여러 각도에서 측정 한 화염대 거리의 평균치로 나타냈다.

### 3.3 액적 직경 및 내부온도의 시간에 따른 변화

#### 3.3.1 대기압 상태에서의 유화연료 액적의 연소

유화연료 액적을 대기압 상태에서 연소시키면, 액적의 내부에서 과열된 수증기의 급격한 팽창현상에 따라서 액적 전체가 폭발하는 미세 폭발(micro-explosion) 현상이 발생한다. 미세 폭발현상은 유화연료 액적의 내부에 미세한 수적의 형태로 혼합되어 있는 물이 액적의 연소가 진행됨에 따라 화염으로부터 전달된 열에 의해 액적이 가열될 때 함께 가열된다. 연료의 비등점이 높아서 대기압 상태에서의 물의 과열한계 온도인 250°C 이상이면, 액적의 온도가 이 온도이상으로 상승하게 된다. 따라서 내부의 미세 수적이 과열한계 온도 이상으로 과열되어 순간적으로 기화하면서 팽창

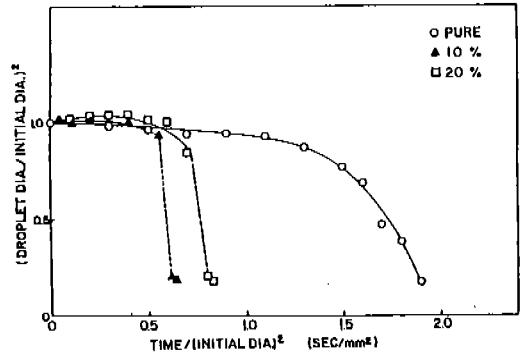


Fig. 3 Variations in squared Droplet Diameter-Time History with Water Content in Atmospheric Pressure

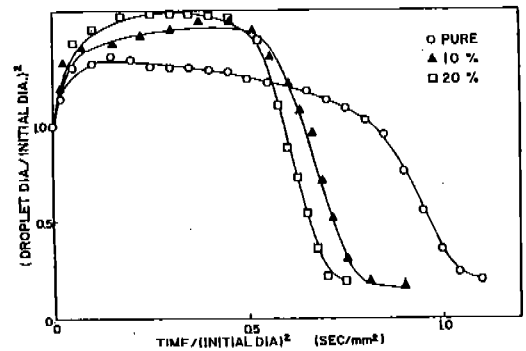


Fig. 4 Variations in squared Droplet Diameter-Time History with Water Content in 5 atm

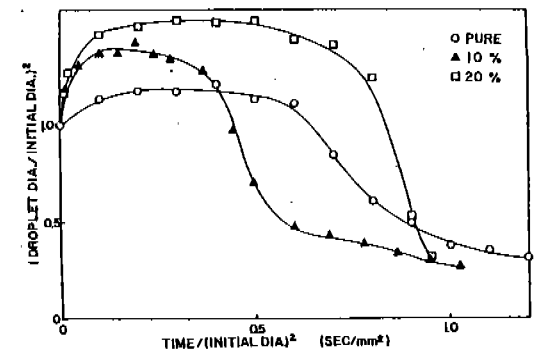


Fig. 5 Variations in squared Droplet Diameter-Time History with Water Content in 10 atm

하는 힘에 의해 원 액적이 폭발하며 분열되는데 이를 미세 폭발현상이라고 한다. Fig. 3, 4 및 5는 액적의 연소시, 액적의 직경의 시간에 따른 변화를 나타내는 그림이고, Fig. 6, 7

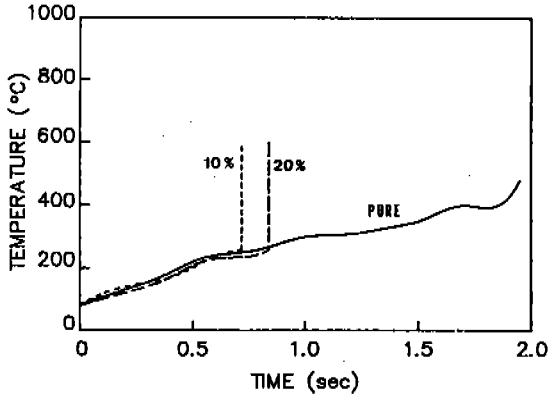


Fig. 6 Variations of Droplet Center Temperature with Water Content in Atmospheric Pressure

및 8은 미세 열전대로 측정된 액적 내부온도의 변화를 나타내는 그림이다. Fig. 3, 4 및 5에서 횡축에 나타낸 시간은 액적 주위에서 화염이 발견되었을 때의 시각을 0로 한 시간으로 액적의 가열시간은 이 시간에는 포함되어 있지 않다. 액적의 가열시간은 대체로 1.0 ~ 1.5 sec 정도로 주위압력과 액적과 점화용 코일 사이의 거리에 따라 변화한다. Fig. 3은 대기압 상태에서의 연소과정을 나타내고 있으며, 유화연료 액적의 연소시에는 액적 직경의 변화는 순수한 경유 액적의 연소시와 거의 유사하게 진행하다가 순수한 경유 액적의 연소시간의 약 40% 정도의 시간이 경과하였을 때 미세 폭발현상이 순간적으로 일어나는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 6은 대기압 상태에서의 연소시 액적 내부온도의 변화를 나타내는 그림으로 순수한 경유 액적의 연소시에는 액적의 내부온도는 계속 상승하여 연소 말기에는 경유의 비등점에 가까운 300°C 정도의 고온까지 상승한다. 연소 종료시에 온도가 급격하게 상승하는 것은 액적의 증발이 완료되어, 열전대의 비이드가 화염에 노출되어 있기 때문이다. 유화연료 액적의 연소시에는 액적의 내부온도가 약 250°C 정도에 도달하면 미세 폭발이 일어나고 연소가 종료된다. 일반적으로 액체 연료로부터의 매연 생성의 주요한 원인은 액체연료의 열분해(thermal cracking) 과정이며, 이 과정은 250°C 이상의 고온에서 활

발하므로, 미세 폭발현상에 의해 액적의 온도의 상승이 억제되는 것이 유화연료의 연소시 매연 생성을 억제하는 효과를 가지는 것으로 생각된다.

### 3.3.2 고압 상태에서의 유화연료 액적의 연소

주위압력을 고압으로 한 상태에서 유화연료 액적을 연소시키면, 대기압 상태에서 연소시킬 때와는 상당한 차이가 나타난다. 고압 상태에서는 유화연료 액적의 연소시에는 연소의 중기에, 액적의 표면으로부터 부분적인 미세 폭발(partial micro-explosion)이 일어나서 연소속도가 빨라지고, 총 연소시간은 짧아진다. 그러나, 대기압 상태에서의 연소에서와는 달리 전체 액적의 미세 폭발현상은 나타나지 않으며, 따라서 액적의 총 연소시간의 단축효

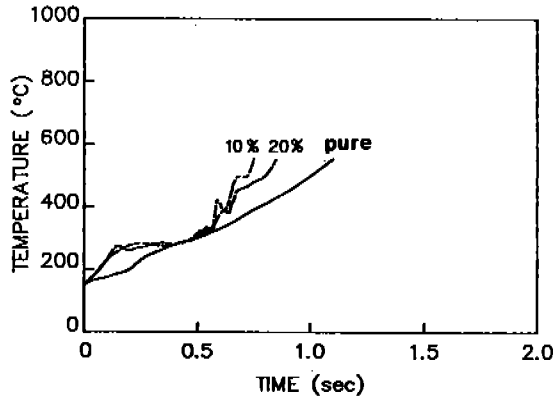


Fig. 7 Variations of Droplet Center Temperature with Water Content in 5 atm

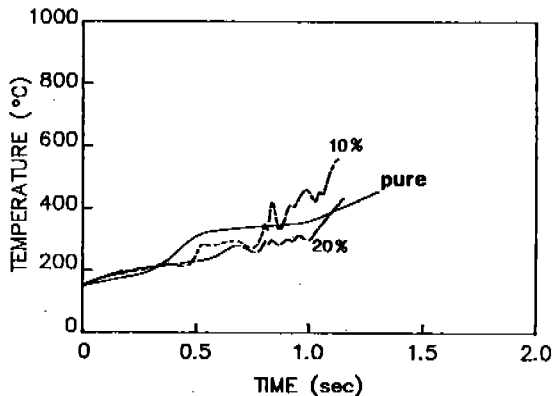


Fig. 8 Variations of Droplet Center Temperature with Water Content in 10 atm

과도 비교적 크지 않다. 부분 미세 폭발은 액적 내부온도가 전체적으로 균일하지 않은 것에 의한 것으로 생각된다. 즉, 주위압력이 증가하면, 화염대의 위치는 액적의 표면부근으로 접근하며, 압력의 증가에 따라서 연료의 비등점도 상승한다. 따라서, 액적 표면 온도가 액적의 내부온도에 비해 빨리 상승하므로, 액적 표면부근의 미세한 수적들이 국소적으로 먼저 미세 폭발을 일으킬 수 있는 과열조건에 도달하므로, 액적의 표면부근에서 국부적인 미세 폭발이 일어나는 것이다. 따라서, 물의 함량이 높을수록 부분 미세 폭발은 활발하게 일어난다. Fig. 7과 8은 고압상태에서의 연소시 액적의 내부온도의 변화를 나타내는 그림이다. 부분 미세 폭발이 발생하면 액적의 내부온도는 심한 변동현상을 나타내는데 이러한 현상은 부분 미세 폭발이 국부적으로 발생함에 따라 액적 자체가 흔들리기 때문이라고 할 수 있다. 한편, 부분 미세 폭발이 발생하기 시작할 때의 액적의 내부온도는 물의 과열온도인 250 °C보다 낮은 온도를 나타내고 있는데 이는 액적의 표면온도는 이미 물의 과열 한계 온도에 도달하고 있는 반면 내부의 온도는 그에 도달하지 않아서 액적 내부온도가 균일하지 않다는 것을 보여주고 있다. Fig. 4와 5는 각각 5atm과 10atm 상태에서의 연소시의 액적 직경의 변화를 시간에 따라 나타낸 것이다. 이 그림에서 연소초기에 연소에 의하여 액적의 질량이 감소하는데도 액적 직경이 증가하는 현상을 볼 수 있는데, 이 현상은 액적 내부의 온도가 상승함에 따라 액적의 체적이 증가하는데 따른 것이다. 특히, 유화연료 액적의 경우에는 이러한 액적의 팽창현상이 더욱 뚜렷한데, 액적 내부의 물 입자의 팽창율이 연료인 경유의 팽창율보다 크기 때문인 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 경유에 물을 첨가한 유화연료의 단일 액적의 연소특성에 대하여 주위압력과 물의 함량 등을 변화시켜 이에 대한 실험을 수행하였으며, 실험결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 유화연료 액적을 대기압 상태에서 연소시키면, 미세 폭발현상이 발생하고 연소시간이 단축된다. 미세 폭발이 일어날 때 액적 내부의 온도는 대체로 물의 과열한계 온도인 250 °C 정도이다.

2) 5atm 이상의 고압상태에서 유화연료 액적을 연소시키는 경우에는 액적의 표면으로부터 부분 미세 폭발현상이 나타나며, 전체액적의 미세 폭발현상은 발견되지 않는다. 이러한 현상은 압력이 증가하여, 액적 내부의 온도에 비해 액적 표면의 온도가 빨리 상승하여 미세 폭발을 일으킬 수 있는 조건이 국소적으로 이루어지기 때문이라고 생각된다.

3) 주위압력이 증가하면 화염대는 액적 표면 쪽으로 접근하며, 유화연료의 경우 물의 함량이 증가하면 같은 효과가 나타난다.

#### 참 고 문 헌

1. Dryer, F. R., "Water Addition to Practical Combustion Systems - Concepts and Applications", Sixteenth Symposium (Int.) on Combustion, pp.279~295, 1977.
2. 정종수, 신현동, "물-오일 유화연료 액적의 연소특성에 관한 연구", 대한기계학회 학술대회 초록집(1984년 춘계), 대한기계학회, pp.404~409.
3. 정종수, "고압하에서의 물-오일 유화연료 액적의 연소특성에 관한 연구", M. S. Thesis, KAIST, 1984.
4. 노석홍, 구자진, 신현동, "대기압 근처에서의 물-오일 유화연료 액적의 연소특성에 관한 연구", 대한기계학회 학술대회 초록집(1983년 춘계), 대한기계학회
5. Rush, J. H. and Krier, H., "Burning of Fuel Droplets at Pressures Greater than atmospheric", Combustion and Flame, V. 22, pp.377~382, 1974.