

## 단일액적의 증발 및 착화특성에 관한 연구

송 규 근\* · 백 병 준\* · 류 호 성\*\*

### A Study of Evaporation and Ignition Characteristics of Single Fuel Droplet

K. K. Song\*, B. J. Baek\*, H. S. Ryu\*\*

**Key words** : Single fuel droplet(단일액적), Evaporation and Ignition Characteristics(증발 및 착화특성)

#### Abstract

Evaporation and ignition characteristics of fuel droplet have major influences on the efficiency and performance of engine. In the present study, the experiment of evaporation and self-ignition of single fuel was performed under the various ambient conditions. An individually suspended droplet of n-heptane, n-hexadecane, ethyl-alcohol, and light oil were employed as a liquid droplet. Evaporation and ignition characteristics were measured by using the video-camera and image processing technique under the various ambient temperatures (up to 1000 OC) and partial pressure of oxygen(up to 60%). The evaporation curve shows that the droplet life time, ignition delay time decreases as the ambient temperature and partial pressure of oxygen increase. The temperature variations of droplet were also reported for various fuel and ambient temperatures. The numerical simulations were carried out to predict droplet diameter and temperature with favorable agreement.

#### 기호설명

$\alpha_{g0}$  : 기액계면에서의 확산계수 ( $m^2/s$ )  
 $B_M$  : 질량전달 수(mass transfer number)  
 $B_T$  : 열전달 수(heat transfer number)  
 $C_p$  : 정압비열(kcal/kg $^{\circ}C$ )  
 $C_{pg0}$  : 기액계면에서의 정압비열(kcal/kg $^{\circ}C$ )

$D_l$  : 액적직경(m)  
 $k_{g0}$  : 기액계면에서의 열전도도(kcal/m $^{\circ}C$ )  
 $L$  : 증발잠열 (kcal/kg)  
 $m$  : 액적질량 (kg)  
 $Nu$  : Nusselt number  
 $P$  : 압력 ( $kg/m^2$ )  
 $P_{O_2}$  : 산소분압 ( $kg/m^2$ )

\* 전북대학교 자동차신기술연구소(원고접수일 : 98년 4월)  
 \*\* 전북대학교 대학원

- Q : 열전달량 (kcal/kg)
- $\rho_{go}$  : 기액계면에서의 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_l$  : 액적의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- Sh : Sherwood number
- T : 온도(℃)
- T<sub>l</sub> : 액적온도(℃)
- T° : 분위기 온도(℃)
- $\tau$  : 착화지연시간(초)
- t : 시간(초)
- y<sub>Ao</sub> : 기액계면에서의 연료증기의 질량분율(%)

## 1. 서 론

현재 디젤엔진, 터어빈, 연소로 등의 연소장치들에서 에너지원으로 사용하고 있는 대부분의 액체연료들은 분무 확산 연소방식으로 연소되고 있다. 이는 분무 연소방식이 응답성이 좋고 고부하 연소가 가능하며 제어하기 쉽다는 등의 이점이 있기 때문이다.<sup>(1)</sup>

분무 확산 연소방식은 액체 연료를 연소실내에 분사하고 이를 연소시키는 방법으로써 분사노즐을 통하여 연소실내로 분사된 연료는 약 10 $\mu$ m~300 $\mu$ m의 액적으로 미립화 되고 공기와 혼합된 뒤 주위의 열을 받아 증발이 일어난다. 이후 연료증기와 공기의 혼합기는 화학반응을 일으켜 착화가 이루어지게 되는데 이러한 일련의 과정은 다양한 성분의 화학적 반응과 상변화를 포함하는 등 매우 복잡하기 때문에 이를 규명하기 위한 단순화된 방법으로써 단일액적의 증발이 검토되었다. 초기의 대표적 연구로써 증발에 대한 고전적인 d<sup>2</sup>법칙의 기본결과가 제시된 후<sup>(2)</sup> 단일액적에 관한 이론적, 실험적 연구<sup>(3,6)</sup>가 이루어져 왔다. 또한 Rah와 Adel<sup>(7)</sup>, Law<sup>(8)</sup>와 Saitoh와Nagano<sup>(9)</sup> 등은 증발과정에서의 착화지연에 관하여 압력, 온도의 영향을 검토한 바 있으며, 단순화된 액적에 대한 수치해석적 해법을 통해 착화이론을 제시한 연구<sup>(10,11)</sup>가 수행된 바 있다. 그러나 이들의 연구는 액적의 거동에 대한 정성적인 분석이 대부분이며 각 과정에 대한 정량화된 체계적인 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 분무연료액적의 정량적인 연구를 위한 단순화된 방법의 하나로 단일 연

료 액적을 정적이고 균질인 고온 분위기 내로 삽입하고 액적의 거동을 관찰함으로써 연료액적의 증발과 착화를 수반하는 다양한 과정을 실험적으로 분석하고자 한다. 또한 이론적인 고찰을 통하여 증발현상을 예측할 수 있는 단순화된 이론식<sup>(3)</sup>을 적용하여 이 과정에 대한 규명과 함께 실제 연소기의 설계 및 디젤기관에서의 연소해석 및 설계에 활용할 수 있도록 하는 것에 그 목적을 둔다.

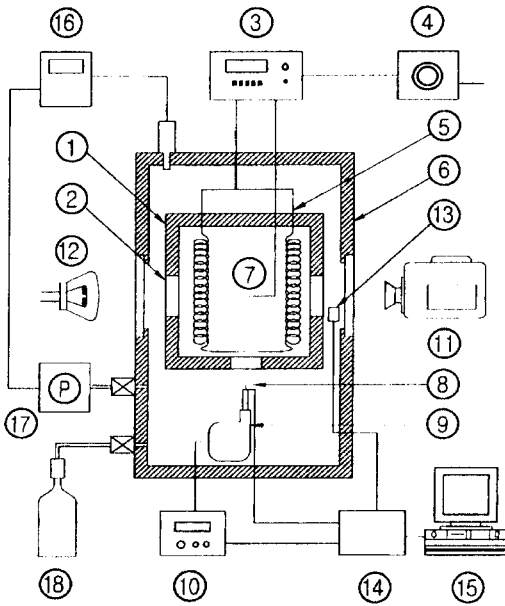
이를 위하여 본 연구에서는 n-heptane, n-hexadecane, 에틸알콜, 경유 등의 연료 액적의 증발과 착화에 대해서 분위기온도 및 당량비 등의 변화에 대한 증발율, 착화지연시간 및 액적온도 등을 실험 고찰하였다. 또한, 이론적인 식을 적용하고, 실험조건을 사용한 수치계산을 통해 액적직경 및 온도변화율을 구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig.1은 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 크게 세부분으로 나누어

- 1) 내부의 온도를 약 1200℃ 까지 가열 할 수 있는 전기로 및 최대 0.6m/s 속도의 액적이송장치
- 2) 액적을 촬영하기 위한 촬영장치(Sony社 30f/s)
- 3) 착화시점 및 액적의 온도를 구하기 위한 자료 처리장치로 구분된다.

액적의 증발 및 착화현상은 micro-syringe를 사용하여 석영계 유리섬유 끝에 직경 1.5~2mm 정도의 연료 액적을 매달은 후에 관찰하였다. 이 액적의 거동을 비디오카메라를 이용하여 촬영한후 PC를 통해 그 크기변화 및 착화특성을 분석하고 동시에 포토트랜지스터에 의해 착화시 발생하는 급격한 전압변화를 확인할 수 있었다. 고온의 전기로내의 분위기 온도는 350℃~1000℃까지 50℃씩 증가시켰다. 산소의 농도는 밀폐용기내의 대기압 상태의 공기를 진공펌프로 감압한 후 산소와 이산화탄소를 주입함으로써 산소분압을 조절하였다. 액적온도는 유리섬유의 경우와 동일한 방법으로 열전대에 부착하여 측정하였으며, 액적주위의 분위기온도는 액적 중심으로부터 반경 2cm 이내에 위치한 열전대에 의해 측정된다.



- ① 전기로 (40×30×60 mm)      ⑩ 액적이송장치 controller
- ② 관찰창(석영유리 t=3mm)    ⑪ 비디오카메라
- ③ 온도 controller              ⑫ 광원
- ④ 전원                              ⑬ Phototransistor (ph301)
- ⑤ 전열선 (5kW)                  ⑭ 증폭기, A/D converter
- ⑥ 밀폐용기                        ⑮ PC
- ⑦ CA 열전대                      ⑯ 압력계
- ⑧ 석영계 유리섬유, 열전대      ⑰ vacuum pump
- ⑨ 액적이송장치                  ⑱ O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

액적의 크기, 온도와 분위기 가스농도 그리고 연료의 종류에 따라 변화하는 증발율, 온도 및 착화지연시간, 액적 수명 시간등에 대한 실험을 수행하였다.

### 3. 이론적 해석

#### 3.1 증발의 기초식

액적의 증발 및 연소의 문제는 열 및 물질이동을 포함하는 복잡한 현상이다. 본 연구에서는 이 문제에 접근하기 위하여 기존의 많은 연구중에서 이론적으로 제안된 식을 도입하여 수치적인 방법

을 적용하여 그 해를 구하였다.

Hiroyasu<sup>(3)</sup>는 단일액적이 고온의 무한 기체 중으로 일시에 삽입될 때 질량 및 에너지보존 법칙으로부터 다음의 물질전달율에 대한 식을 얻었다.

$$\frac{dm}{dt} = -\pi D_l \rho_{go} \alpha_{go} \ln(1+B_M) \cdot Sh \quad (1)$$

또한, 액적의 온도 변화는 열평형 방정식으로부터 다음과 같다.

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{1}{mc_{pl}} \left\{ L \frac{dm}{dt} + \pi D_l k_g (T_\infty - T_l) \frac{\ln(1+B_T)}{B_T} \cdot Nu \right\} \quad (2)$$

여기서,

$$B_M = \frac{y_{Ao}}{1 - y_{Ao}} \quad (3)$$

$$B_T = \frac{C_{pgo} (T_\infty - T_l)}{Q} \quad (4)$$

$$Q = mC_p dT/dt \quad (5)$$

한편, 액적직경의 변화율을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\frac{dD_l}{dt} = \frac{2}{\pi D_l^2 \rho_l} \left( \frac{dm}{dt} - \frac{\pi D_l^3}{6} \frac{d\rho_l}{dT_l} \frac{dT_l}{dt} \right) \quad (6)$$

연료의 물성치를 각종 문헌에서 인용하고 실험 조건을 대입하여 계산하였다. 수치 계산은 Runge-Kutta방법을 사용하였으며 각 시간 단계 (time step)마다 (1)식, (2)식과 (5)식을 동시에 계산함으로써 Δt시간 경과후의 액적 직경과 액적의 온도를 계산하였다. 자세한 계산방법 및 변수처리법은 참고문헌(12)과 같다. Fig.2는 대표적인 결과중에서 n-Heptane의 액적직경의 자승의 변화를 나타낸 증발곡선이다. 시간과 온도증가에 따라 액적직경의 크기가 감소함을 알 수 있다.

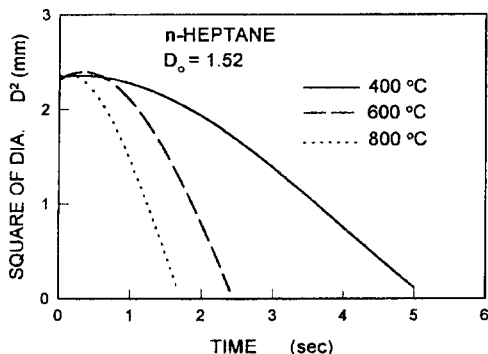


Fig.2 Variations of the droplet diameter with time

### 3. 2 착화지연에 관한 식

단일액적의 착화과정은 본질적으로 액적의 증발로 인한 연료증기와 공기가 혼합된 혼합기내에서의 화학반응이라고 생각할 수 있다. 그러나 착화지연기간 중에 있어서의 화학반응에 대한 어려움 및 자료의 부족으로 착화에 관한 조건을 구하기 곤란하여, 여기서는 일반적으로 통용되는 단순한 형태의 경험식을 사용하였다. 균일 혼합기의 착화지연에 대한 영향인자로는 액적의 종류와 분위기가스의 압력, 온도 그리고 당량비를 들 수 있다. 이를 일반식의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = AP^B \Phi^C \exp(D/T) \quad (7)$$

여기에서 A, B, C, D는 실험상수로써 각 계수들은 실험적으로 구한다.

## 4. 실험결과 및 고찰

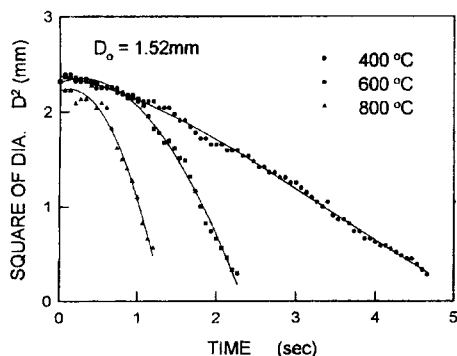
### 4.1 증발곡선

액적직경 자승의 시간에 따른 변화를 실험적으로 측정하여 Fig.3과 Fig.4과 같은 증발곡선을 나타내었다. Fig. 3은 산소농도 1.0에 대해 각 연료의 분위기 온도를 400 °C, 600 °C, 800 °C로 한 실험 결과이다.

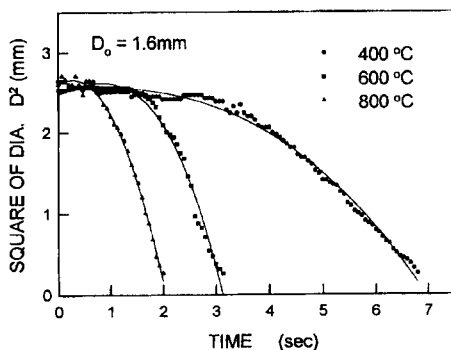
액적의 크기는 증발초기에 약간 상승하며 완만한 기울기를 보이던 곡선은 시간이 경과함에 따라 선형적으로 감소하다가 소멸한다. 증발초기의 곡

선 부분은 낮은 증발율과 액온상승으로 인한 액적의 팽창에 의한 것으로 이 기간은 액적의 종류에 따라 다르지만 전체 액적 증발기간의 10%~30% 정도를 차지하고 있다. 연료에 따라서 비교해 볼 때, 이 경향은 비교적 비점이 높은 n-hexadecane (비점 ; 287.5 °C)과 경유(비점 ; 210 °C~325 °C)에서 두드러진 경향을 나타내고 있었으며, 이것은 반대로 비점이 낮은 n-heptane(비점 ; 98.4 °C)과 ethylalcohol(비점 ; 78.3 °C)에서는 상대적으로 짧은 것을 볼 수 있는데 이로써 초기의 액적의 가열 시간은 비점이 높은 연료에서 길었다.

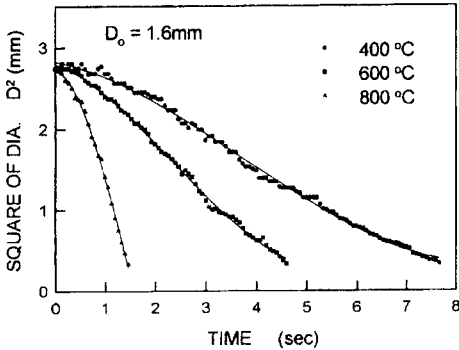
액적의 가열과정이 끝난 후 액적의 증발은 일정한 기울기를 가지고 이루어지는데 이때 이 기울기 값 즉,  $dD^2/dt$ 가 증발율이며, 이 증발율은 분위기 온도의 상승과 함께 증가함을 알 수 있다. 분위기 온도의 변화에 따른 증발곡선의 형태는 네 경우 모두 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 단, 경유에 대한 증발 곡선의 경향이 다른 것에 비해 조금 매



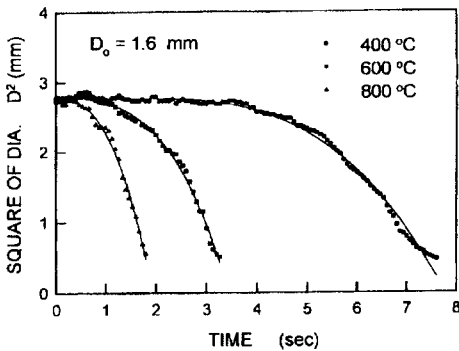
(a) n-Heptane



(b) n-Hexadecane



(c) Ethylalcohol



(d) Light oil

Fig. 3 Variation of the droplet diameter

끄럽지 못한 것을 볼 수 있는데, 이는 분위기가스의 온도가 높은 경우에 액적이 열분해를 일으키기 때문인 것으로 생각된다. 또한 낮은 온도 400℃의 경우에 곡선 후반부의 증발율이 일정하지 않은데 이는 경유가 혼합연료로써 여러 가지 비점이 다른 성분들로 구성되어 있기 때문으로 판단된다. Fig. 4는 분위기온도를 600℃로 일정하게 하고 액적주위의 산소농도를 변화시켰을 때의 증발곡선을 나타낸다. 실험결과는 n-hexadecane에 대한 것으로 공기중의 산소분압과의 비율 ( $P_{O_2}/0.21P$ )로 정의된 분위기 산소농도( $q'$ )를 각각  $q'=1.0$ ,  $q'=1.5$ ,  $q'=2.0$ 로 변화시켰을 때의 결과이다. 산소농도( $q'$ )가 높아짐에 따라 증발속도가 빨라지는 것을 알 수 있으며 이로 인하여 착화도 빨리 일어난다.

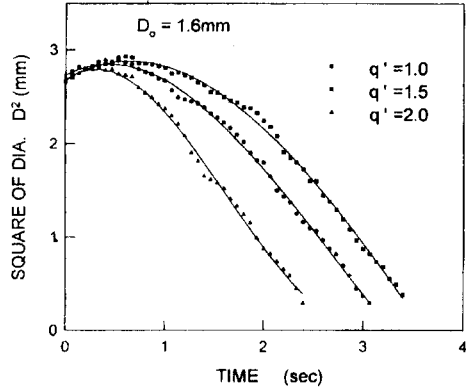


Fig. 4 Variations of droplet diameter with time for oxygen concentration

#### 4. 2 증발형상

Photo. 1은 액적의 증발형상을 가시화한 사진으로써 시간에 따라 연속적인 형상변화를 관찰할 수 있다. 연료 n-hexadecane에 대한 것으로써 분위기 온도가 650℃이며 열전대에 부착된 액적의 증발형상을 나타낸 것이다. 각 프레임에 대한 시간 간격은 0.23초로써 등간격이다, 약 1.7초 후에 착화가 발생하였고 그후 직경의 감소율이 급격히 증가함을 알 수 있으며 3.1초후에 액적이 완전히 증발하였다.

#### 4. 3 착화지연

착화지연 시간은 연료액적이 고온의 분위기로 삽입된 후 착화가 일어날 때 까지의 시간으로써 착화지연에 영향을 미치는 인자로는 무수히 많이 있다. 본 실험에서는 이들 중에서도 특히 영향을 많이 미친다고 생각되는 분위기 온도, 분위기 산소농도 및 초기 액적크기의 영향을 검토하였다.

##### 4.3.1 분위기온도의 영향

Fig. 5은 착화지연에 미치는 분위기 온도의 영향을 나타낸다. 분위기 온도를 400~950℃까지 변화시켜 가면서 각각의 연료에 대해서 착화지연 시간을 측정된 결과로써 세로축은 로그좌표계이며 가로축은 온도의 역수를 나타낸 것이다. 연료 종류에 따라 착화지연시간은 약간의 차이가 있지만, 전반적인 착화지연시간  $\tau$ 는  $e^{1/T}$ 에 선형적으로 비례하는 경향을 보이고 있다. 이것은 주위온도가

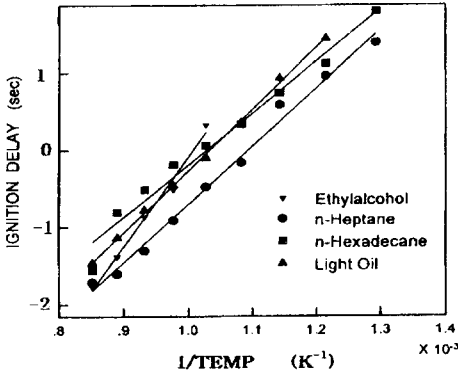


Fig. 5 Comparison of ignition delay time for an environmental temperature

높아짐에 따라 증발이 쉽게 이루어지며, 엔탈피 상승으로 착화지연이 짧아진다고 생각된다.

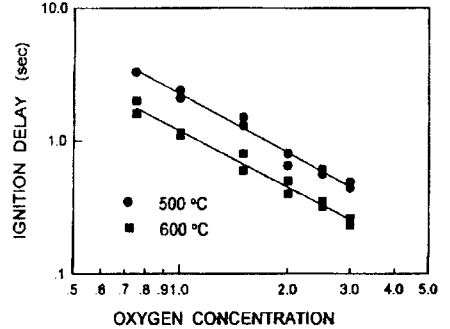
4.3.2 분위기 산소농도의 영향

Fig. 6은 분위기 산소농도가 착화지연에 미치는 영향을 분위기 온도 500℃와 600℃에서 측정한 실험 결과이다. 각 경우에서 분위기 산소농도(q')는 0.75~3.0의 범위에서 변화시켰다.

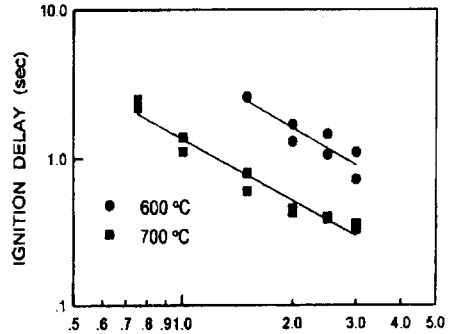
모든 연료에 대해서, 분위기 산소농도가 증가할수록 착화지연시간은 감소하고 있으며, log-log좌표축에서의 농도 변화에 대한 지연시간은 선형적인 관계를 보이고 있다. 또한, 같은 분위기 산소농도에서는 분위기 온도가 높을수록 착화지연시간이 짧아진다. 분위기가스의 압력이 일정할 때 균일 혼합기의

착화지연에 대한 영향인자로는 액적의 종류와, 온도 그리고 산소농도라 할 수 있다. 본 연구에서는 다음과 같은 일반식의 형태를 사용하여 착화 지연시간을 예측할 수 있는 상관관계식을 도출하였다.

$$\tau = Aq'^B \exp(C/T) \tag{6}$$



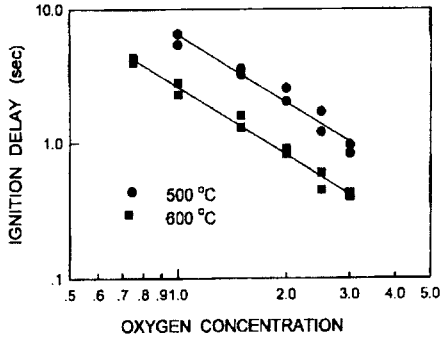
(a) n-Heptane



(b) Ethylalcohol



Photo. 1 Evaporating of n-hexadecane droplet ( $\delta t = 0.23 \text{sec}$ ;  $t_e = 3.1 \text{sec}$ ;  $T_2 = 650^\circ\text{C}$ )



(c) Light Oil

Fig. 6 Ignition delay time with oxygen concentration rate at 500°C, 600°C and 700°C

Table 1 The constant of correlation equation

	A	B	C
n-Heptane	2.63E-4	-1.43	7535
n-Hexadecane	9.86E-4	-1.98	6723
Ethylalcohol	2.57E-4	-1.68	11617
Light oil	8.19E-6	-1.41	7992

A, B와 C는 실험상수로써 각 계수들은 실험적으로 구할 수 있으며 그 결과는 다음표와 같다.

4.3.3 액적크기의 영향

Fig. 7은 n-Heptane과 경유의 초기 액적 직경의 크기에 대한 착화지연 시간의 관계를 나타낸다.

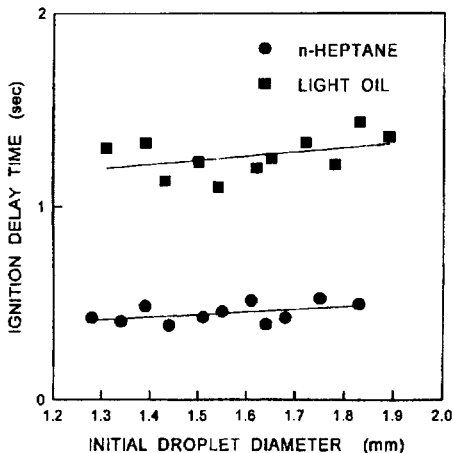


Fig. 7 Ignition delay time with initial droplet diameter for n-heptane and light oil

액적의 크기는 n-heptane의 경우에 지름 1.28~1.83mm까지, 경유의 경우에는 지름 1.31~1.89mm까지 변화시켜가면서 측정하였다. 액적크기의 변화가 크지 않고 착화지연시간이 매우 짧아 측정오차가 있으나, 실험의 범위 내에서는 액적의 크기가 증가함에 따라 착화지연시간은 비례하여 약간 증가하는 경향이 있음을 볼 수 있다.

4.4 액적수명시간

Fig. 8는 액적이 증발 및 연소되어 소멸되는 시간 즉, 액적의 수명시간에 대해서 측정한 결과를 보여주고 있다. 연료로는 n-heptane을 사용하였고 또한, 분위기온도를 400°C~800°C의 범위, 분위기 산소농도는 1.0~3.0의 범위에서 변화시키면서 실험하였다.

그림에서 알 수 있듯이, 액적 수명시간은 분위기 온도가 증가함에 따라 저온부분에서는 급격한 감소를 보이다가 고온분위기로 갈수록 점차 같은 기울기를 가지며 빨리 증발되고 있다. 또한 같은

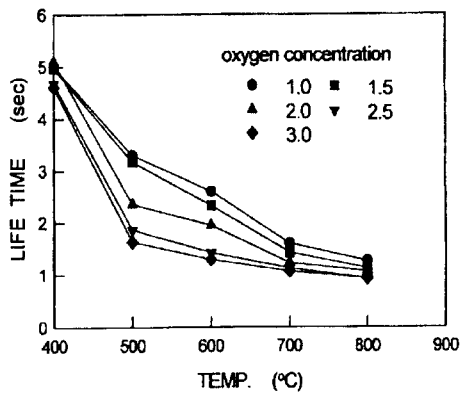


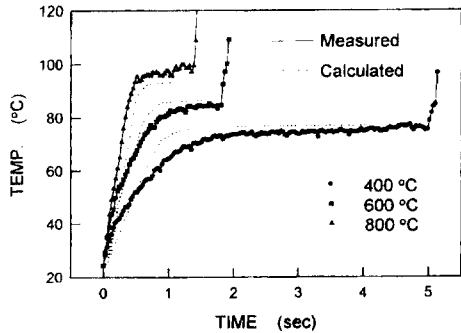
Fig. 8 Droplet life time environment

온도에서 분위기 산소농도가 높아질수록 액적수명시간이 짧아지는 것을 볼 수 있는데 이는 착화가 발생함으로 인해 분위기 온도가 급격한 상승 및 화염의 복사열전달에 기인된다.

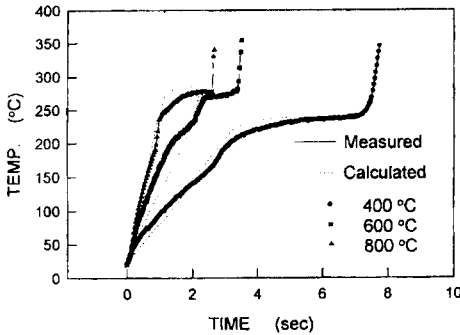
4.5 액적온도

액적의 온도는 노내로 삽입된 후 상승하는 액운의 경향을 알아봄과 함께 이론적으로 계산한 액적

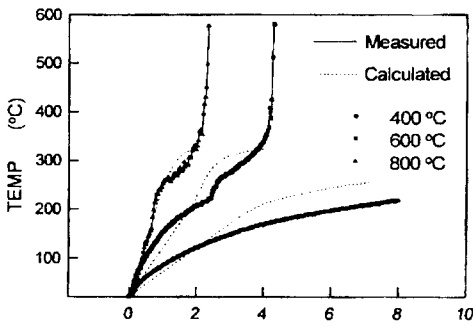
온도 변화율을 검증하기 위하여 측정하였다. Fig. 9은 액적온도의 변화율에 대한 그림으로써 (a)는 n-heptane, (b)는 n-hexadecane, (c)는 경유에 대한 것이며, 각각 분위기온도가 400℃, 600℃, 800℃인 경우에서의 결과이다. 실선은 측정값을, 점선은 계산값을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이



(a) n-Heptane



(b) n-Hexadecane



(c) Light Oil

Fig. 9 Variations of the droplet temperature with time

액적의 온도는 삽입 초기에는 급격히 상승하다가 일정한 온도에 다다른 후 거의 일정한 값을 가진다. 이때의 온도가 평형온도가 되며, 높은 분위기 온도에서는 거의 비점에 가깝게 접근하고 있다.

액적의 종류에 따라서 평형온도는 많은 차이가 있음을 알 수 있는데 n-hexadecane, 경유 등에서의 같이 높은 온도의 비점을 가진 연료에서 높은 평형온도를 가지고 있음을 볼 수 있다. 또한 같은 액적 내에서도 분위기온도에 따라 평형온도가 차이가 있음을 볼 수 있으며, 이로써 착화가 발생하여 분위기 온도가 상승하는 경우에도 역시 평형온도가 상승함을 알 수 있다.

비교적 비점이 높은 n-hexadecane과 경유에 있어서는 액적온도가 상승하는 도중에 착화가 발생하여 기울기의 변화가 발생하고 있으며, 착화가 발생함으로 인한 분위기온도의 상승으로 평형온도가 비점 근처의 온도까지 상승함을 볼 수 있다.

일정한 비점을 갖는 순수연료와 비교하여 (c)의 경유는 혼합연료로써 넓은 영역의 비점을 갖고 있기 때문에 기울기 변화를 가지며 거의 증발이 완료될 때까지 액적온도가 상승하는 것을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 단일 연료액적의 증발 및 착화에 대한 특성들을 실험적, 이론적으로 검토하였다. 이 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 액적의 증발은 고온의 환경에 삽입된 직후 팽창, 팽창과 증발의 공존 및 급격한 증발, 착화 과정으로 구성된다. 증발은 분위기온도, 산소농도의 증가에 따라 신속히 이루어지며 연료의 비점이 높을수록 현저한 증발 및 착화의 지연이 나타난다.
2. 착화지연에 관한 상관관계식을 액적의 종류에 따라 분위기 온도, 산소농도를 함수로하여 제시하였다.
3. 증발하는 액적의 온도는 초기에 급격히 상승한 후 완만한 변화를 하였다. 분위기 온도에 따라 그 상승율은 증가하고 증발시간은 짧아진다.



4. 기존이론식을 적용하여 수치계산에 의해 직경변화 및 착화지연시간을 예측할 수 있었다.

### 참고문헌

- 1) Arthur H. Lefebvre "Atomization and Sprays", Hemisphere publishing corporation (1989)
- 2) Williams A. ,Fundamentals of Oil Combustion, Progress in Energy Combustion Science, Vol 2, pp. 1976
- 3) 角田敏一, 廣安博之, "高温 高壓の 氣體中における 單一 液滴の 蒸發", 日本機械學會論文集, Vol.41, pp.2475-2485 (1975)
- 4) Faeth G. M. and Olson D. R., "The Ignition of Hydrocarbon Fuel Droplets in Air, SAE Trans ,Vol.77 pp.1793 (1968)
- 5) Chin J. S. and Lefebure A. H., "Steady-state Evaporation Characteristics of Hydrocarbon Fuel", prop AIAA J., Vol. 21, No10 pp. 1437-1433 (1983)
- 6) H. Nomura, Y. Ujiie and H. J. Rath, "Experimental Study an Droplet Evaporation of Hydrocarbon Fuel at High Pressures", 3rd Asian-Pacific (International) Symposium on Combustion and Energy Utilization, pp. 396-401 (1990)
- 7) Sang-Chun Rah. and Adel F. S., "Ignition and Combustion of Liquid Fuel Droplets part II", Combustion Science and Technology, Vol. 49, pp.169-184 (1986)
- 8) C. K. Law, "Recent Advances in droplet Vaporization and Combustion", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 8, pp. 171-201 (1982)
- 9) Saitoh T. and Nagano O., Combustion Science and Technology, Vol. 22,pp. 227-234 (1980)
- 10) Sirignano, W. A., Progress in Energy and Combustion Science, Vol.9, pp. 219-322(1983)
- 11) Dwyer H. A., Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 15, pp.131-158 (1989)
- 12) 백인철, "단일액적의 증발 및 착화에 관한 연구", 전북대학교 석사논문, 1997

### 저 자 소 개



**송규근(宋圭根)**

1954년 12월 26일생. 1981년 전북대학교 졸업. 1987년 일본북해도 대학졸업(박사). 현재 전북대학교 기계공학부 부교수



**백병준(白秉峻)**

1955년 7월 1일생. 1979년 서울대학교 졸업. 1990년 미국 미주리 대학교 졸업(박사). 현재 전북대학교 기계공학부 부교수



**류호성(柳虎成)**

1962년 7월 5일생. 1985년 전북대학교 졸업. 1987년 전북대학교 대학원 졸업(석사). 현재 전북대학교 대학원 박사과정 재학중