

## 대기압하에서의 에틸알코올과 케로신 연료액적의 연소에 관한 연구

한재섭\*, 김선진\*\*, 박봉엽\*, 김 유\*

### Combustion of ethyl alcohol and kerosene fuel droplets in atmospheric pressure

jae-seob Han\*, seon-jin Kim\*\*, bong-yeop Park\*, yoo kim\*

#### ABSTRACT

This paper presents the results of an experimental investigation on the combustion of single droplets and droplet arrays of Ethyl alcohol and kerosene fuel droplets in atmospheric pressure. The initial droplet diameters,  $d_0$ , were nominally 1.3~1.8mm, and inter-droplet separation distance  $l(d_0 = 1.31 \sim 2.60)$ . Experimental results indicate that burning rate constants(K) of ethyl alcohol and kerosene droplets were independent of initial droplet size as 0.0083, 0.0095  $cm^2/sec$ . For 1-D droplet array's kerosene fuel droplet, burning rate constants(K) decreases with decreasing normalized inter-droplet distance. Normalized inter-droplet distance has stronger effect on 2nd fuel droplet than 3rd fuel droplet. When normalized inter-droplet distance is larger than 2.60, the effect of droplet spacing on droplet life is very small.

#### 초 록

본 연구에서는 대기압하에서의 에틸알코올과 케로신 연료액적의 단일액적과 액적배열시 연소에 대한 실험적 조사의 결과를 보여주고 있다. 초기액적 직경은 정상적으로 1.3~1.8mm이었고 표준화된 초기 액적거리 간거리  $l/d_0$ 는 1.31~2.60이었다. 실험결과 에틸알코올 및 탄화수소계 연료인 케로신의 연소속도상수(k)는 초기 액적크기에 관계없이 각각 0.0083, 0.0095  $cm^2/sec$ 로 일정하였다. 1차원 종렬로 배열된 케로신 연료액적은 표준화된 초기액적간 거리( $l/d_0$ )가 감소할수록 연소속도 상수(k)는 감소하였으며 3번째 액적보다 2번째 액적이 더욱 많은 영향을 받았고 2.60이상에서는 액적수명 감소에 영향을 미치지 못하였다

\* 충남대학교 기계공학과 (Chungnam Univ. Dept. of Mechanical Eng.)

\*\* 청양대학 소방안전관리과 (Chongyang Colledge Dept. of Fire Safety Eng.)

## 1. 서론

심각한 에너지 위기의 직면과 관련하여 다양한 대체 에너지원의 개발과 함께 기존 에너지원(특히 차지하는 비중이 큰 액체연료)의 효율적인 사용은 상당히 중요한 문제로 대두되고 있다.

분무연소시스템을 사용하는 로켓엔진을 비롯한 디젤, 가스터빈 엔진, 액체 연료보일러, 노(furnaces), 산업용 가열기 등 대부분의 액체연료의 연소에 있어서 연소효율의 향상을 위해서는 액체 연료의 미립화 향상, 연소방법 등 여러 형태의 연구가 필요하며, 그 중 액적의 증발거동에 대한 이해를 통하여 액체연료의 기화, 즉 증발과정을 향상시키는 방법에 대한 연구는 가장 우선시 되어야 할 부분이다 이와 같은 장치들에 있어서는 개개 액적의 연소보다는 분무연소가 지배적이기는 하지만, 실제 연소실에서 발생하는 액적들의 연소현상의 규명에 단일액적 해석의 결과를 이용하는 것은 액적간의 상호작용이나 진동 등 여러 인자로 인해 많은 어려움이 제기되었다. 따라서, 분무연소를 이해하는 데는 실제 연소기에서 일어날 수 있는 여러 유사한 상황에서의 단일액적에 대한 해석, 액적 배열에 대한 해석 및 여러 인자들에 대한 실험이 필수적으로 필요하게 되었다.<sup>1),2),3)</sup>

액적에 대한 증발, 착화, 연소특성 해석을 위해 많은 연구가 진행되어왔으며 컴퓨터의 전산속도에 힘입어 1980년대 말부터 본격적인 연구가 행해지고 있다. 우리나라의 경우도 대부분 액적에 대한 이론적 연구에 집착하여 실험적 기초결과들이 아주 미비한 실정이다.

본 연구에서는 복합적인 분무연소의 특성들을 이해하기 위한 기초단계로서 간단한 액적 연소 시험장치를 구성하여 탄화수소계 액적의 복잡한 연소특성을 이해하고 액적 배열에 대한 기본 개념을 제시하고자 하였다.

## 2. 이론

액체연료의 분무연소(spray combustion)의 연구에 있어서는 단일 연료 액적(single fuel droplet)의 연소에 대한 연구가 기초가 된다. 분무의 연소(combustion of sprays)에서의 혼합기는 액적군과 예혼합기의 집합으로 보게 된다. 액적 직경이 10  $\mu\text{m}$ 이하에서는 기체연료와 같이 취급할 수 있으나, 50  $\mu\text{m}$ 이상으로 되면 화염대는 불연속으로 작은 비예혼합(화산)화염의 집합으로 된다. 또한, 액체분무는 액상과 기상이 공존하는 2상 유동으로서 액적의 운동과 증발, 분사액체와 주위 기체와의 혼합, 그리고 연소 시스템의 경우에는 착화와 연소 등의 대단히 복잡한 물리적인 과정과 화학적인 반응들을 포함하게 되므로 그 현상의 불 균일성으로 인하여 자세한 해석에는 상당한 어려움이 있다. 따라서, 고립된 단일 액적(液滴) 및 액적의 배열 연소에 대한 충분한 이해는 보다 복잡한 화염을 다루기 전에 거쳐야 할 필수적인 과정일 뿐 아니라 어떠한 상황하에서는 그 자체의 특성만 이해해도 충분할 정도로 매우 중요한 것이다.

정지상태의 단일액적 연소에 대한 대표적인 연구결과로서 Godsave, Spalding, Williams 등은 다음과 같은 가정하에 준정상이론(quasi-steady theory)을 주장하였다.<sup>1)</sup>

①액적으로부터 증발된 연료증기는 액적표면으로부터 화염대(flame front)로, 산화제는 대기중에서 화염대로, 연소반응에 의한 생성물(product)은 화염으로부터 대기중으로 확산에 의하여 전달.

②액적주위에서 대류의 영향은 무시하며 액적과 화염은 모두 구대칭.

③가정하에서의 열 및 물질전달은 등압상태에서 이루어지며 액상에서의 물질전달에 비해 속도가 매우 빠르므로 준정상상태(quasi-steady state)로 가정.

④화학반응은 화염대에서 순간적으로 이루어지며 따라서 화염대는 무한히 얇고 화염대에서의 연료증기와 산화제의 농도는 제로(0)이다.

- ⑤ 화학반응은 완전하게 이루어짐.
- ⑥ 연소에 의해 발생한 연료의 증발을 위한 잠열을 공급하기 위해 액적으로 전달되고 나머지는 주위 대기로 전달.
- ⑦ 액적 온도는 액적 전체에서 균일.
- ⑧ 복사(radiation)와 확산에 의한 2차 열전달 효과는 무시.

이러한 가정 하에 얻어진 결과는 다음과 같다.

① 액적직경의 제곱( $d_s^2$ )은 시간에 대해 선형함수. (보통  $d^2 - Law$ 로 불리움)

$$\text{즉, } d_s^2 = d_o^2 - Kt \quad (1)$$

$d_o$  : 초기의 액적직경

$K$  : 연소속도상수 (burning rate constant)

$t$  : 시간(time after ignition)

② 질량연소속도(mass burning rate)는 액적직경에 비례. 즉,  $\dot{m} \propto d_s$

③ 연소시간(combustion lifetime, 착화시부터 소화시까지의 소요시간)은 초기 액적직경의 제곱에 비례하고 연소속도에 반비례한다.

$$t_B \propto \frac{d_s^2}{K} \quad (2)$$

④ 액적 직경에 대한 화염대직경의 비는 연소 중 일정하다.

$$d_f/d_s = const \quad (3)$$

$d_f$  : 화염대직경(flame diameter)

$d_s$  : 액적직경(droplet diameter)

⑤ 연소계의 주위 압력증가는 연소특성에 대해 직접적인 영향이 없으며 물성치(property)변화에 따른 직접적인 영향만을 나타낸다.

이러한 준정상이론에 의한 예측중에서  $d^2 - Law$ 에 대해서는 실험에서도 어느 정도 일치한다. 그러나, 실제의 액적에 있어서 액적 주위에서의 기상(gas-phase)에서의 열 및 물질 전달은 비정상적 (unsteady)이다. 실험에 의한  $d_f/d_s$ 는 연소 중 일정하지 않으며 거의 시간에

따라 선형적으로 증가한다는 것이 알려져 있다. 준정상이론의 문제점에 대하여 여러 가지 실험에 의한 보완과 여러 가정들에 대한 검토 등이 시도되어 왔는데 Kumagai & Isoda, Spalding, Kotake & Okazaki, Waldman, Law, Prakash & Sirignano 등은 비정상적인 기상반응(gas-phase-reaction)을 고려하여 여러 가지 예측을 하였으며 그 결과 준 정상이론에 의한 예측보다는 실험결과에 가까운 예측결과를 얻어낼 수 있다고 보고되어 있다.

### 3. 실험

연구에 사용된 연료액적으로는 실험결과가 보편적으로 잘 제시되어 있는 에틸알코올( $C_2H_5OH$ )과 대표적인 탄화수소계 연료인 케로신을 사용하였다. 연구수행결과 얻어진 액적에 대한 결과들은 분무연소의 연소특성을 해석하기 위한 기본이 되며 이는 전반적인 액적 연소에 대한 해석측면에서 근본적인 자료를 제공하였다.

#### 3.1 실험장치

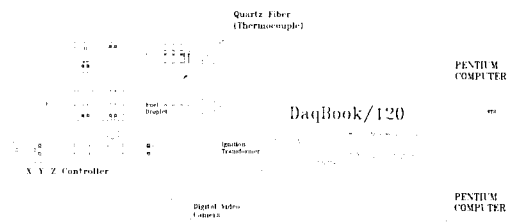


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

실험에 사용된 액적 연소실험장치의 모습은 그림 1과 같으며 본체의 구성은 크게 액적공급부, 액적지지봉 및 점화장치로 구분 할 수 있다. 액적공급부에서 액적공급관은 외경 4mm의 의료용 고무관을 이용하였으며 공급관 끝 부분에는 주사바늘을 노즐대신 부착하여 사용하였다.

액적지지봉은 석영(quartz)으로 제작하였는데 이 석영 필라멘트봉은 지름이 0.3mm정도이며 이 지지봉의 끝부분은 액적을 지지할 수 있도록 지름 0.5~0.6mm정도의 구형 비이드(beed)로 되어 있다.

점화장치는 스파크를 이용하여 액적을 착화시킬 수 있도록 하였으며 불꽃에 직접적인 영향을 줄이기 위하여 실험액적으로부터 약 3mm 정도 떨어지도록 장착하였으며 2차 정격이 16.5kVo, p24mA 인 Ignition(HF) Transformer를 사용하였다.

### 3.2 실험방법

액적발생기 내에 있는 연료 주입부에 연료를 채우고 연료공급 노즐(1 ml/cc 일회용플라스틱 주사기)이 액적 지지봉의 끝부분(beed)에 닿도록 그림 2와 같은 3축 트레버스 컨트롤러를 이용하여 액적을 지지봉에 묻힌다. 이때 액적의 초기 직경크기는 실험에 중요한 요소가 된다.

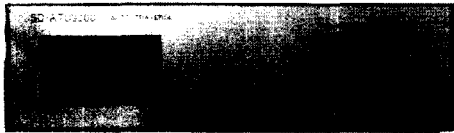


Fig.2 Traverse controller

액적의 초기 직경이 너무 크면 착화시나 연소에 액적 지지봉으로부터 떨어지는 수가 있으며 한편 지나치게 작으면 액적 지지봉의 비이드(beed)로의 열전달에 의한 비정상(非正常, unsteady)효과가 커진다. 몇 번의 시행오차적인 실험결과 적당한 초기액적 직경은 1.4~1.8mm 정도이었다. 액적의 상호작용 및 반대유동에 대한 영향을 관찰 할 때에는 액적 지지봉의 상단에 정밀 측정자를 부착하여 액적 사이의 간격조절에 사용하였다.

액적의 점화후 액적의 액적의 직경, 화염형태 등에 대한 연소특성은 250X 확대가능한 디지털 비디오 카메라(GR-DVL300)를 사용하여 얻었다.

표 1에 본 실험조건을 간략하게 정리하였다.

Table.1 Experimental conditions

구 분	단일액적 연 소	액적배열연소 (3개 액적)
실험 (액적간격,mm)	.	2, 3, 4
측정대상	시간변화에 따른 액적의크기 및 화염형태의 변화	
사용연료	에틸알코올 케로신	케로신
액적지지봉	석영(Quartz) (0.1~0.3mm)	
측정장치	DIGITAL VIDEO CAMERA (초당 30FLAME)	

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 실험결과와 처리방법

준정상이론에 의하면 중력의 효과를 무시해서 액적과 화염을 등심구형을 이루며 구 대칭이라고 가정하였으나 실제로 고정액적(suspended droplet)의 연소에 있어서 액적은 중력방향을 장방향으로 하는 타원체 형태이다. 따라서, 디지털 캠코더에 의해 얻어진 액적의 직경, 화염형태 등은 액적 표면적에 의한 방법(식4)과 액적 체적에 의한 방법(식5)등에 의거 보정이 필요하다.

$$\text{VOLUME} : d_{eq}^2 = (a^2 b)^{2/3} \quad (4)$$

$$\text{AREA} : d_{eq}^2 = \frac{a^2 + ab \frac{\sin^{-1} e}{e}}{2} \quad (5)$$

$$\text{단, } e = \frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{b}$$

$a$  : 액적의 수평방향 직경

$b$  : 액적의 수직방향 직경

$d_{eq}$  : 유효직경(effective dia.)

본 실험에서는 상기의 두 가지방법으로 실험결과 얻어진 액적직경의 유효직경을 계산하여 비교해 본 결과 그 차이는 2-5%미만이었기 때문

에 실험액적의 수평방향 직경을 결과 및 고찰에 사용된 액적 직경  $d_s$ 으로 사용하였다. 또한, 액적의 순간직경을 초기직경으로 나누어 제공해서 표준화하였으며 시간축도 액적 초기직경의 제곱으로 나누어서 처리하였다.

4.2 화염형태

그림 4, 5(a)는 에틸알코올( $C_2H_5OH$ )과 케로신 연료액적의 단일연소 화염의 형태이고 그림 5(b)는 그림 3과 같은 배열구조를 갖는 케로신 액적군의 연소화염의 형태를 보여주고 있다.

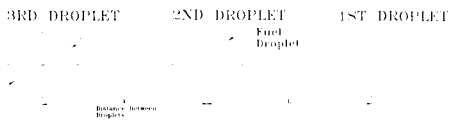
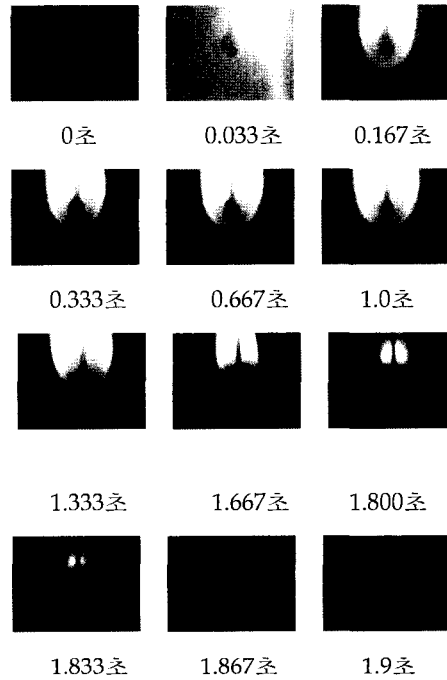


Fig. 3 Schematic of droplet-group combustion



(a) a burning droplet of kerosene

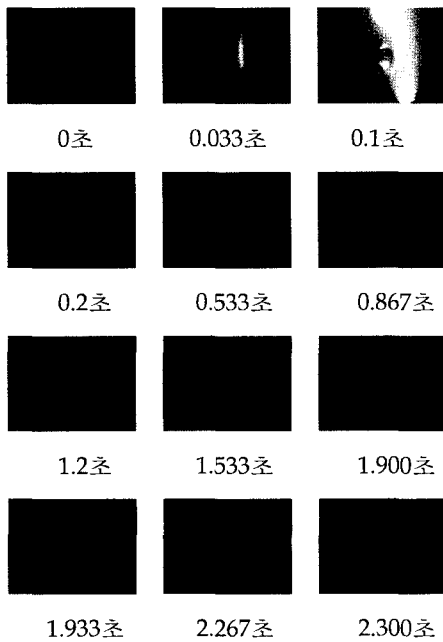
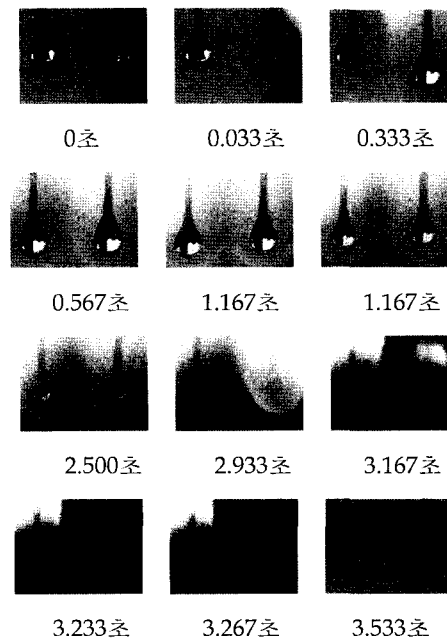


Fig. 4 Sequence of a burning droplet of ethyl alcohol at 0.1MPa



(b) burning droplet-group of kerosene

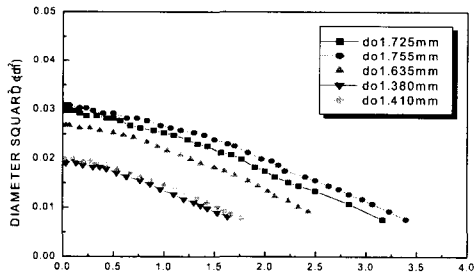
Fig. 5 Sequence of kerosene-droplet at 0.1MPa

그림 4의 에틸알코올 연료액적의 화염형태는 그림 5의 케로신 연료액적의 화염형태와는 달리 연소말기에 원 액적이 분열되어 액적 지지봉 주위로 크게 확산되는 미세폭발에 의한 화염변동이 관찰되었다. 따라서, 화염대도 크게 팽창하였다가 주위에 비산하였던 작은 연료액적이 증발하여 연소됨에 따라 지지봉 주위로 화염이 접근하였다. 에틸알코올 화염은 주간에는 매우 희미하여 거의 눈에 보이지 않았다.

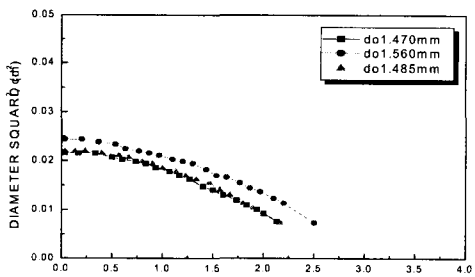
4.3 액적연소실험

4.3.1 단일액적

그림 6(a),(b)는 대기압 조건에서 다양한 액적 크기를 갖는 에틸알코올과 케로신 연료액적에 대한 연소시 직경변화( $d^2$ )의 시간에 따른 변화를 나타내어주는 그래프이다.



(a) Ethyl alcohol



(b) Kerosene

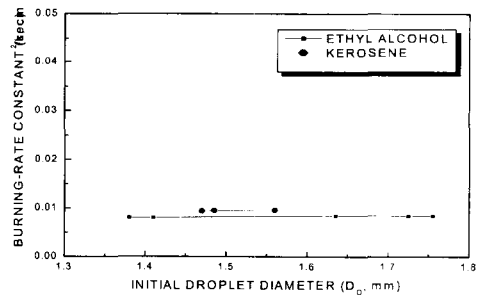
Fig. 6 Histories of droplet diameter squared for different size at atmosphere pressure (0.1MPa)

그림 6 (a),(b)는 착화후 액적직경은 어느 정도 시간(약 0.8sec)동안은 거의 변화가 없으며 연소 중·후반부에 감소하는 것을 보여주고 있다. 이처럼 초기에 액적직경이 거의 감소하지 않는 것은 액적 내부온도의 상승에 의한 밀도의 감소로 인하여 액적의 팽창효과가 나타나는 동시에 연소 중·후반부에 비하여 화염대로부터 액적으로 전달된 열량이 대부분 액적내부의 온도증가에 사용되어 증발에 필요한 잠열의 공급이 작아 액적으로부터의 증발량이 상대적으로 작기 때문으로 사료된다.

그림 7(a),(b)는 임의의 순간적인 시간에서 곡선의 경사도를 의미하는 연소속도 상수(k)값을 에틸알코올과 케로신 연료액적의 액적크기에 따른 변화를 나타내어주는 그래프이다. 그림 7(a),(b)에서 착화후 액적직경의 변화가 거의 없는 어느 정도 시간(약 0.8sec)동안의 측정 데이터는 천이과정으로 고려되어 분석대상에서 제외하였다.

FUEL	Ethyl alcohol (By G.A.E GODSAVE <sup>1)</sup> )	Ethyl alcohol	kerosene
Measured values of burning-rate constant ( $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ )	0.0076	0.0084	0.0094
	0.0087	0.0084	0.0096
	0.0082	0.0085	0.0095
	0.0082	0.0081	
Mean Value	0.0081	0.0083	0.0095

(a) Experimental data



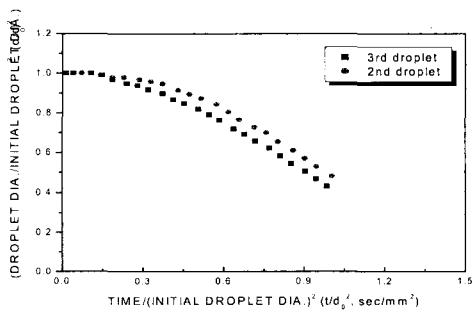
(b) Graph

Fig. 7 Effect of initial diameter on burning-rate constant k at atmosphere pressure (0.1MPa)

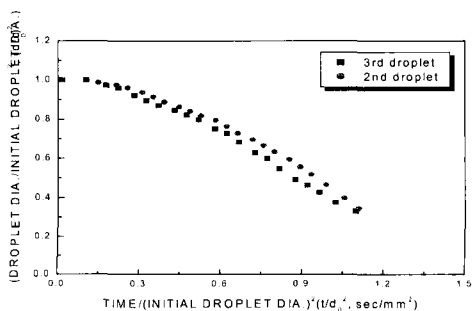
실험결과 얻어진 에틸알코올 액적에 대한 결과값은 G.A.E GODSAVE에 의한 실험결과 값과 비교할 때 상당히 유사한 결과값을 보여 주었으며 또한, 실험에 사용된 에틸알코올 및 탄화수소계 연료인 케로신의 연소속도상수(k)는 초기 액적크기에 관계없이 각각 0.0083, 0.0095  $cm^2/sec$ 로 일정함을 보여 주었다. 이러한 결과로 판단할 때 액적의 초기직경은 연소속도 상수(k)에는 거의 영향을 미치지 않는다고 판단할 수 있다.

4.3.2 액적군 연소

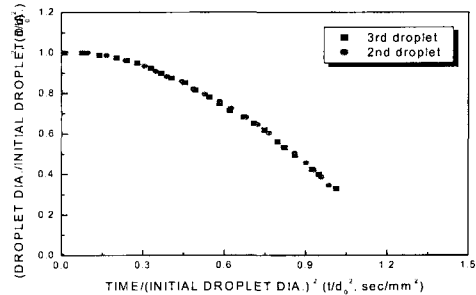
그림 8, 9는 Fig.3과 같은 액적군 배열구조를 갖는 표준화된 초기 액적거리,  $l/do$ 하에서 표준화된 연소시 액적직경  $(d/do)^2$ 의 표준화된 액적수명,  $t/do^2$ 에 따른 변화를 나타내어주는 그래프로서 표준화하기 위하여 액적의 순간직경을 초기직경으로 나누어 제공하였으며 시간축도 액적 초기직경의 제곱으로 나누어서 처리하였다.



(a)  $l/do=1.31$



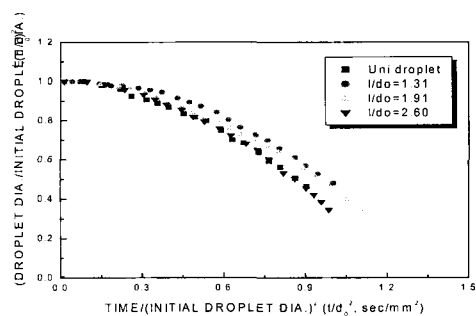
(b)  $l/do=1.91$



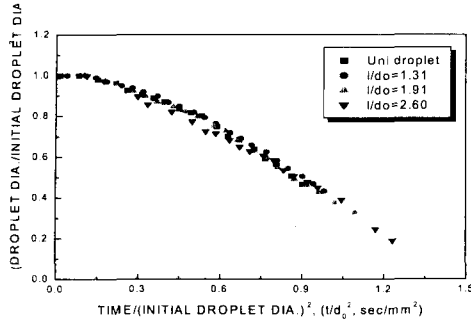
(c)  $l/do=2.60$

Fig. 8 Histories of droplet diameter squared for distance between droplets  $l$  ( $l/do=1.31-2.60$ )

그림 8은 액적 중심간 거리( $l/do=1.31-2.60$ )변화에 따른 결과 그래프로서 표준화된 초기 액적거리( $l/do$ )가 멀어질수록 액적수명이 짧아짐을 보여주고 있으며 이러한 영향은 양쪽에 연소가 진행중인 액적을 가지는 2번째 연료액적이 더 크게 영향을 받고 있음을 보여주고 있다. 이러한 원인은 표준화된 초기 액적거리가 가까워지면 액적의 연소에 필요한 공기유입이 원활히 이루어지지 않아 정상적인 액적연소에 영향을 미치기 때문으로 사료된다. 실험결과 표준화된 초기 액적거리( $l/do$ ) 2.60이상에서는 액적수명에 영향을 미치지 못하였다.



(a) 2nd droplet



(b) 3th droplet

Fig. 9 Histories of droplet diameter squared for distance between droplets l ( $l/d_o=1.31-2.60$ )

그림 9(a), (b)는 1차원 종렬로 배열된 케로신 연료액적에 대한 연소특성에 액적간 간섭이 미치는 영향을 보여주는 결과로서 2번째 연료액적은 표준화된 초기 액적간 거리( $l/d_o$ )가 감소할수록 연소속도 상수( $k$ )가 감소하였으나 3번째 연료액적은 액적간 상호작용에 크게 영향을 받지 않음을 보여주고 있다.

## 5. 결 론

단일액적 및 액적군에 대하여 연소 시간변화에 따른 액적의 크기 및 화염형태를 측정함으로써 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 에틸알코올 및 탄화수소계 연료인 케로신의 연소속도상수( $k$ )는 초기 액적크기에 관계없이 각각  $0.0083$ ,  $0.0095 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 일정하였다. 이 결과는 기존 연구결과와 잘 일치하였다.

2. 종렬로 3개의 액적이 배열된 액적군 연소에서 표준화된 초기액적간 거리( $l/d_o$ )가 2.60이상에서는 액적수명 감소에 영향을 미치지 못하였다.

3. 1차원 종렬로 배열된 케로신 연료액적은 표준화된 초기액적간 거리( $l/d_o$ )가 감소할수록 연소속도 상수( $k$ )는 감소하였으며 3번째 액적보다 2번째 액적이 더욱 많은 영향을 받았다.

4. 각 조건에서의 실험결과는 상당히 훌륭한 재현성을 보여주었으며, 추후 실험내용에 대한 신뢰성 확보할 수 있었다.

## 6. 참고문헌

- GODSAVE, G.A.E, "Studies of the combustion of drops in a fuel spray-the burning of single droplets of fuel", fourth Symposium(Int.) on combustion, 1953
- Tasi, J. S., Arthur M. Sterling, "The Combustion of Linear Droplet Arrays," 23th Symposium(Int.) on combustion, The Combustion Institute, pp. 1405-1411, 1990
- KOKAI, O.MORIUE, MARAKI, M.TSUE, and MKONO ETC., "Pressure Effects on Combustion of Metanol/Dodecanol Single Droplets and Droplet Pairs in Microgravity", COMBUSTION AND FLAME 121:501-512, 2000
- 국정진, 박승호, "연소실에 분사된 액적 간의 상호작용과 연소현상에 대한 수치적 연구," 한국연소학회지, Vol.4, pp. 17-26, 1999