

# 일차원 액적 배열하에서 화염 퍼짐에 관한 실험적 연구

박 정\* · 신현동\*\* · 小林秀昭\*\*\* · 新岡嵩\*\*\*  
(1998년 9월 9일 접수)

## An Experimental Study on Flame Spread in an One-Dimensional Droplet Array

Jeong Park, Hyun Dong Shin, Hideaki Kobayashi and Takashi Niioka

**Key Words:** Flame Spread(화염 퍼짐), Flame Propagation(화염 전파), Droplet Spacing(액적 간격), Subcritical Pressure(아임계 압력), Supercritical Pressure(초임계 압력)

### Abstract

Experimental investigations on flame spread in droplet arrays have been conducted under supercritical ambient pressures of fuel droplet. Flame spread rates are measured for n-Decane droplet of diameters of 0.75 and 1.0mm, using high speed images of OH chemiluminescence up to 3.0MPa. The pattern of flame spread is categorized into two: a continuous mode and an intermittent one. There exists a limit droplet spacing, above which flame spread does not occur. Flame spread rate with the decrease of droplet spacing increases and then decreases after taking a maximum. It is also seen that there exists a limit ambient pressure, above which flame spread does not occur. Flame spread rate decreases monotonically with the increase of ambient pressure. Exceptionally, in the case of a small droplet spacing, flame spread with the increase of ambient pressure is extended to supercritical pressures of fuel droplet. This is caused by enhanced vaporization with the increase of ambient pressure. Consequently, in flame spread with droplet droplet spacing, the relative position of flame to droplet spacing plays an important role. The monotonic decrease with ambient pressure is mainly related to the reduction of flame radius in subcritical pressures and the extension to supercritical pressures of flame spread is caused by the reduction of ignition time of unburnt droplet due to the enhanced vaporization at supercritical pressures.

#### 기호설명

- D : 액적 직경
- P : 분위기 압력
- s : 액적 간격
- $t_s$  : 화염 퍼짐 시간
- $t_f$  : 가연 혼합기의 일부가 점화한 후 가연 혼합기총을 전파하는 전파 시간
- $t_i$  : 미연 액적 주위의 가연 혼합기의 점화 시간

- $t_{th}$  : 기연 액적 주위에 형성된 열경계층이 미연 액적까지 전파하는데 걸리는 시간
- $t_d$  : 미연 액적 주위의 가연 혼합기의 일부가 점화하기까지의 물리적·화학적 점화 지연 시간

### 1. 서론

보일러, 가스 터빈, 디젤 엔진, 로켓 등 대부분의 실제 연소기에 액체 연료가 주로 사용되며 연소 강도는 가스화, 혼합을, 및 화학 반응 과정 등에 의해 지배된다. 따라서, 가스화 및 혼합을의 증진을 위해 고온 공기에 노출되는 연료 표면적

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\*\* 東北大學 流體科學研究所

의 증가를 위한 분무화는 필수적이며 여러 가지 분무 방식의 개발을 통하여 점화 및 연소 특성을 향상시켜 왔다. 분무 연소에 있어서 점화 및 화염 퍼짐 특성에 관한 연구는 다양한 부하에 대한 화염 안정성의 측면에서 매우 중요하다. 그러나, 실제 분무 연소장에서의 초기 연소 특성은 유체 역학적, 열역학적, 및 화학 반응 과정뿐만이 아니라 액적간의 상호 작용 등 복잡한 현상에 의해 실제적 이해가 제한되어 왔다. 단일 액적에 대한 점화 특성의 연구<sup>[1-5]</sup>가 분무 연소기 내에서의 점화 기구를 이해하는데 많은 기여를 해왔지만, 연소기내의 초기 연소 특성에 대한 이해의 증진을 위해서는 화염 퍼짐 거동에 대한 많은 이론적 및 실험적 접근들이 요구된다. 그러나, 실제 분무기를 통한 직접적 접근은 액적외 직경, 액적 간격, 주유류의 속도, 분위기 압력과 온도 등 다양한 인자에 의해 영향을 받기 때문에 복잡한 양상을 띤다. 이러한 관점에서 일차원 액적 배열은 화염 퍼짐(flame spread) 거동을 체계적으로 이해할 수 있는 유용한 수단을 제공함에도 불구하고 소수의 실험적 연구들만이 문헌상에 보고되었다.<sup>[6-8]</sup>

대기압 조건하에서 수행된 실험을 통해 화염 퍼짐(flame spread) 시간과 취리렌 상에 의해 정의된 침수 깊이(immersion depth)와의 상관 관계가 보고되었고<sup>[6]</sup>, 화염 퍼짐 시간이 가연 혼합기층내에 일부가 점화하는 시간과 가연 혼합기층내 화염이 전파하는 시간으로 표현되는 간단한 모델이 제시되었다<sup>[7]</sup>. 이러한 연구들은 대기압 조건에서 액적 직경에 비해 액적 간격이 충분히 커서 가연 혼합기내에서의 화염 전파 시간이 화염 퍼짐 시간에 비해 무시될 수 있는 간헐적 화염 퍼짐 모드외 경우들에 대해서만 실험이 수행되었다. 따라서, 액적 간격이 작아서 물리적으로 액적 풀(droplet pool)로 접근하는 경우에 대한 평가는 주어지지 않았다. 액적 연료의 아임계 압력(subcritical pressure) 범위에서 분위기 압력을 증가시키면 화염 퍼짐율이 단조 감소하며, 액적 간격과 분위기 압력의 변화에 따른 화염 퍼짐 거동은 두 가지 대표적인 모드(mode)를 갖는다는 것이 보고되었다<sup>[8]</sup>. 즉, 연속적인(continuous) 화염 퍼짐 모드는 액적 간격이 작고 저압에서 관찰되며 간헐적인(intermittent) 화염 퍼짐 모드는 액적 간격이 크고 고압에서 나타난다. 그러나, 이러

한 연구 역시 액적 직경에 대한 액적 간격이 상대적으로 크고 분위기 압력 범위가 0.1-0.5MPa로 낮은 압력 범위에 대해서만 실험이 수행되었다. 이상으로부터 대기압 및 아임계 압력 하에서 일차원 액적 배열을 통한 화염 퍼짐 거동에 관한 이러한 연구들은 실제 분무 연소기내의 현상들을 체계적으로 이해하는데 기여하여 왔지만 현재의 상황에서는 좀더 다양한 액적 간격과 액적 직경의 조건으로의 확장된 연구가 요구된다. 또한, 실제 연소기들은 대부분 고압에서 운전되는 점을 감안하면 액적 연료의 초임계 압력(supercritical pressure) 범위로의 확장된 연구가 필수적임에도 불구하고 단일 액적외 연소, 증발 및 점화에 관한 연구들<sup>[1,4,9,10,11]</sup>이 있었지만 액적 배열 내에서 화염 퍼짐 거동에 관한 연구는 문헌상에 보고된 바 없다.

현재의 연구에서 초임계 압력을 포함하는 고압 분위기 하에서 일차원 배열을 갖는 액적열에 대한 화염 퍼짐에 관한 실험이 수행된다. 화상 증폭 장치(Image Intensifier)가 장착된 고속 카메라를 사용하여 OH 라디칼의 화학 발광 상(chemiluminescence image of OH radical)으로부터 화염 퍼짐율이 측정된다. 미연 액적 주위의 연료 증발 및 점화 거동을 OH 라디칼 화학 발광상과 비교하기 위해 칼라 CCD 카메라에 의한 직접 가지화가 수행된다. 액적 직경 1.0 및 0.75mm에 대해 각각 최소 액적 간격이 1.5mm와 1.0mm로부터 화염 퍼짐의 한계 액적 간격(limit droplet spacing)까지 변화시키면서 화염 퍼짐 거동이 관찰된다. 분위기 압력은 0.1-3.0MPa 범위에서 실험이 수행되며 사용된 연료는 n-Decane( $n-C_{10}H_{22}$ ,  $T_b=447.3K$ ,  $T_c=617.6K$ ,  $P_c=2.11MPa$ )이다.

## 2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 실험 장치도를 나타낸다. 장치는 크게 고압 연소실, 점화 장치, 액적 배열을 고정하고 액적 간격을 조절하도록 고안된 액적 배열 지그(jig), 고속 카메라와 모니터 시스템, 스텝 모터에 의해 구동되는 4축 자동 이송기, 그리고 노트북 P/C로 구성된다. 고압 연소실 내부는 내경 260mm, 길이 410mm, 두께는 20mm의 최대 내압은 5.0MPa이다. 고압 연소실에는 50mm 직경의 두 개의 관찰 창을 갖는다. 한 개의 창은 OH 라

디칼의 화학 발광 상을 얻기 위해 석영 유리로 하고, 반대편에 위치하는 창은 칼라 CCD 카메라에 의한 직접 가시화를 위해 파이렉스 강화 유리로 구성하였다.

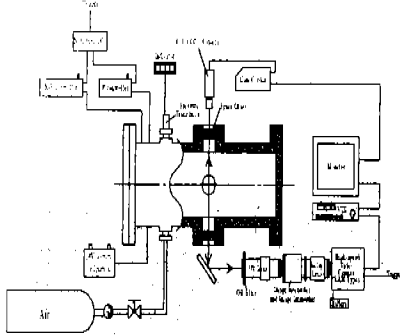


Fig. 1 Schematic drawing of experimental apparatus.

Fig. 2는 일차원 액적 배열을 생성하기 위한 장치를 나타낸다. 수평 일직선상에 액적 배열을 생성하기 위해 실리카 파이버(silica fiber)로 제작된 서스펜더(suspender)가 내경 1mm의 세라믹관에 고정되어 액적 배열 지그위에 배열된다. 서스펜더의 직경은  $130 \pm 5 \mu\text{m}$ 이고 용이한 액적의 부착을 위해 끝부분은  $300 \pm 25 \mu\text{m}$  구형으로 가공된다. 서스펜더는 미세한 액적 간격 조정의 용이성을 위해 내부 각이 135도를 유지하도록 두 번 구부러진다. 연료 공급 계는 50 $\mu\text{l}$ 의 내부 용적을 갖는 미소 주사기(micro-syringe)와 스텝 모터로 작동되는 4축 자동 이송기로 구성된다. 각 서스펜더의 위치를 먼저 감지하고 노트북 P/C로부터의 명령에 의해 연료가 각 서스펜더에 공급된다. 4축 자동 이송기의 작동 시작으로부터 14개의 서스펜더에 연료가 공급되는데 걸리는 시간은 약 4분이고, 7개의 서스펜더에 대해서는 약 3분이다. 사용된 연료는 n-Decane( $n\text{-C}_{10}\text{H}_{22}$ ,  $T_b=447.3\text{K}$ ,  $T_c=617.6\text{K}$ ,  $P_c=2.11\text{MPa}$ )이다. 서스펜더에 공급된 액적은 타원형이며 점진된 등가 직경은 다음과 같은 식으로 얻어진다<sup>[1,4,5,8]</sup>.

$$D = (D_1^2 D_2)^{1/3} \quad (1)$$

여기서  $D_1$ ,  $D_2$ 는 각각 단경과 장경을 나타내고 공급된 액적 직경의 최대 측정 에러는  $\pm 2.7\%$ 이다. 점화기(igniter)를 위한 가열 선은 0.3mm의 칸달 선이고 0.7초간 8A가 공급되면 첫 번째 액적이 점화하여 미연 액적층으로 화염이 전달된

다. 화염 퍼짐율은 Figure 1에 보여진 바와 같이 화상 증폭기가 탑재된 고속 CCD 카메라에 의해 OH 라디칼 화학 발광 상으로부터 측정된다. 노출 시간은 1/400s이고, 간섭필터의 중심 파장은 307nm, 반치폭은 11.4nm이다.

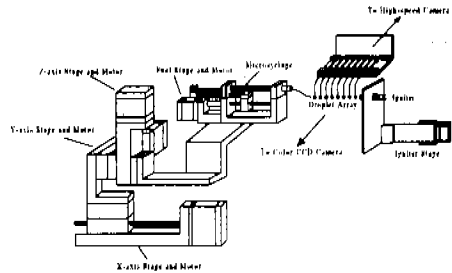


Fig. 2 Schematic representation of droplet array generation system.

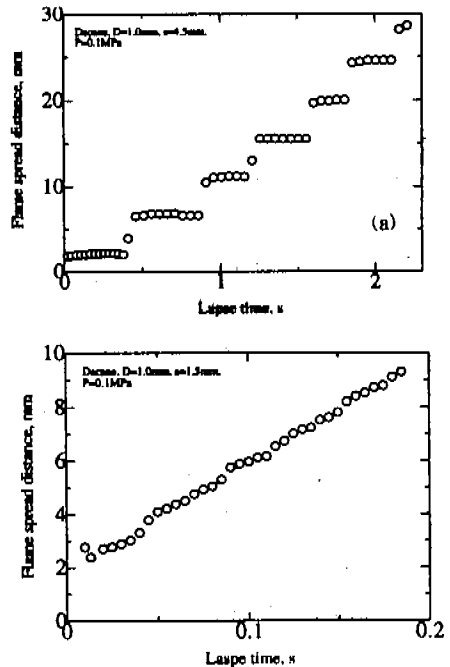


Fig. 3 Variation of flame spread distance with time  $P=0.1\text{MPa}$ , (a)  $s=4.5\text{mm}$  (b)  $s=1.5\text{mm}$ .

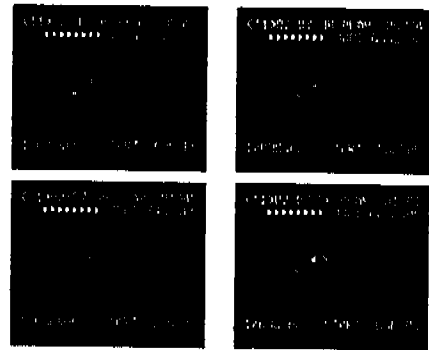
Fig. 3은 대표적으로 액적 간격이 큰 경우와 작은 경우에 대해서 시간에 따른 화염 퍼짐 거리를 나타낸다. 화염 퍼짐 거리 및 시간의 영(zero) 값들은 첫 번째 액적의 중심과 화염이 통과하는

시간을 각각 나타낸다. 초기의 비주기적 액적 간격 구간은 점화 원으로부터의 영향에 기인하며 Figure 3에 나타나는 바와 같이 3번째 액적 구간 이후에는 시간에 따른 화염 퍼짐 거리가 주기적으로 나타낸다. 액적 간격을 각 구간에서 측정된 전파 시간으로 나누어 구간 화염 퍼짐율을 구하고 측정에 사용되는 액적 간격 구간에 대한 평균으로부터 평균 화염 퍼짐율을 구했다. 사용된 서스펜더는 7개이고 화염 퍼짐을 측정에 사용되는 액적 간격 구간은 점화 원의 영향과 비대칭성의 문제가 있는 마지막 액적 간격 구간을 제외한 3-5이다. 그러나, 압력이 증가하여 비정상성 및 자연 대류 효과가 커지는 경우에 있어서는 14개의 서스펜더를 사용하였고 화염 퍼짐을 측정에 사용되는 액적 간격 구간은 3-12이다. 분위기 가스는 공기이며 연료의 초임계 압력에서 급격히 줄어드는 표면 장력으로 기연 액적이 연소실 바닥으로 낙하하는 현상이 나타나는 3.0MPa로 분위기 압력은 제한된다.

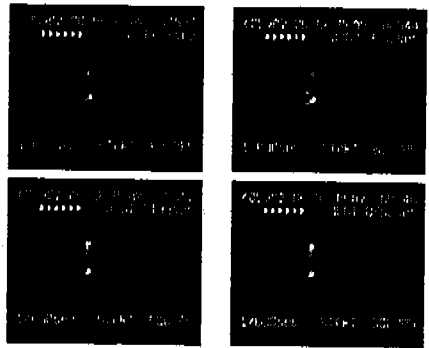
### 3. 실험결과 및 논의

Fig. 4는 대표적으로 액적 간격이 작은 경우와 큰 경우에 있어서 대기압 분위기에서의 전형적인 화염 퍼짐 거동의 OH 라디칼 화학 발광 사진을 나타낸다. 액적 간격이 큰 경우에 있어서는 화염은 간헐적 퍼짐(intermittent spread) 특성을 나타낸다. 즉, 화염은 한정된 시간 동안 액적 간격 안의 거의 고정된 위치에서 체류하면서 열전달에 의해 인접한 미연 액적(unburnt droplet)의 증발을 촉진시킨다. 미연 액적 주위의 가연 혼합층의 일부가 점화한 후 화염은 급히 가연 혼합층내를 전파하여 미연 액적 주위에 형성된다. Figure 3b에 나타난 바와 같이 화염 퍼짐 거리가 짧은 시간 동안 급격히 증가하는 구간은 미연 액적 주위에서의 화염 퍼짐을 나타내고 거의 변화가 없는 구간은 화염이 액적 간격 사이에서 체류하면서 미연 액적 주위 가연 혼합기가 점화하기까지 열전달하고 있음을 의미한다. 액적 간격이 더 증가하면 미연 액적 주위의 가연 혼합기의 점화 시간보다도 기연 액적(burning droplet)의 연소 수명 시간(combustion life time)이 더 짧아 화염이 미연 액적 주위로 전달되지 않는 한계 액적 간격(limit droplet spacing)이 존재한다. 한편, 액적

간격이 감소하면서 액적 간격 사이에서 화염의 체류 시간이 감소하게 되고 액적 간격이 그 이상으로 감소하면 화염의 액적 간격 사이에서의 체류 시간이 사라지게 되어 화염 퍼짐은 연속적인(continuous) 형태로 나타나게 된다. Figure 3a에 나타나는 바와 같이 액적 간격 구간에서 화염 퍼짐 거리가 일정하게 유지되는 구간이 사라지고 화염 퍼짐 거리가 연속적으로 증가하는 것을 알 수 있다.



(a)



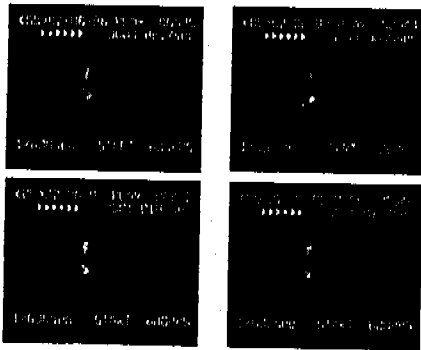
(b)

Fig. 4 Typical OH chemiluminescence images of flame spread at atmospheric condition ; D=1.0mm, P=0.1MPa, (a) s=4.5mm and (b) s=1.5mm.

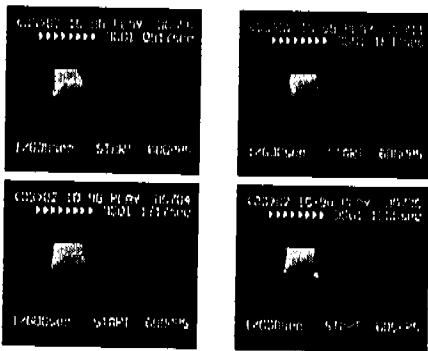
한편, 화염 퍼짐 시간( $t_s$ )은 다음과 같이 표현될 수 있다<sup>(7,8)</sup>.

$$t_s = t_f + t_i = t_f + t_m + t_d \quad (2)$$

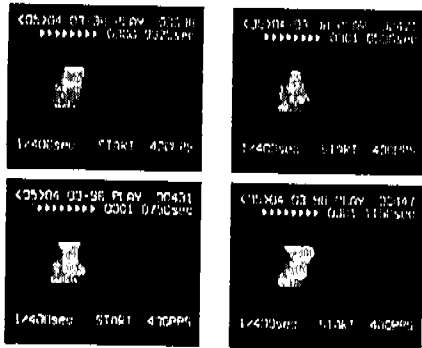
여기서,  $t_i$ 는 미연 액적 주위의 가연 혼합기의 점화 시간,  $t_f$ 는 가연 혼합기의 일부가 점화한



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Typical OH chemiluminescence images of flame spread with ambient pressure ; ; D=1.0mm, s=1.5mm, (a) P=0.1MPa, (a) P=0.8MPa, and (c) P=2.5MPa.

후 가연 혼합기층을 전파하는 시간을 나타낸다. 점화 시간은 다시 가연 액적 주위에 형성된 열경계층이 미연 액적까지 전달되는데 걸리는 시간( $t_{th}$ )과 미연 액적 주위의 가연 혼합기층의 일

부가 점화하기까지의 물리적 및 화학적 점화 지연 시간( $t_d$ )으로 나눌 수 있다. Fig. 3으로부터 알 수 있듯이 간헐적 퍼짐을 나타내는 경우에는  $t_f$ 가 상대적으로 작고 한계 액적 간격 근처로 접근함에 따라  $t_i \gg t_f$ 가 되어 화염 퍼짐 시간은 근사적으로 점화 시간( $t_i$ )만으로 표현될 수 있다. 연속적 화염 퍼짐을 나타내는 경우는 액적 간격의 감소로 미연 액적이 고온 가스층에 노출되면서 가연 액적으로부터의 열전달이 증가하게 되어  $t_i$ 는 점점 작아지게 된다. 따라서, 연속적 화염 퍼짐 거동은 간헐적 모드로부터  $t_i$ 의 감소에 기인한다.

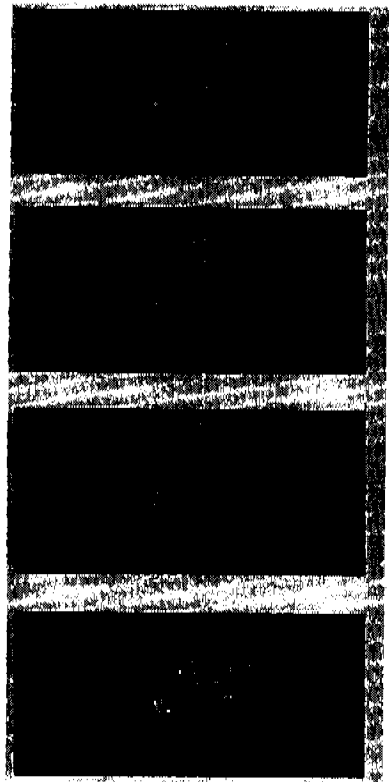


Fig. 6 Direct images of typical flame spread at a supercritical pressure of fuel droplet ; D=1.0mm, s=1.5mm, P=2.2MPa.

Fig. 5는 대기압 분위기에서 연속적인 화염 퍼짐을 나타내는 액적 간격(D=1.0mm, s=1.5mm)으로 고정시키고 분위기 압력을 증가시키면서 OH

라디칼 화염 발광에 의한 화염 퍼짐 거동을 관찰한 경우를 나타내고 있다. 분위기 압력을 증가시키에 따라 화염 퍼짐이 연속적인 모드로부터 간헐적 모드로 바뀌고, 연료의 초임계 압력 (supercritical pressure)에서 화염 퍼짐이 존재하는 경우에서도 간헐적 모드는 유지된다. 그러나, 아임계 압력(subcritical pressure)에서는 미연 액적 표면 근처에서 점화가 발생하는 반면 초임계 압력에서의 점화 위치는 미연 액적 주위에 상대적으로 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 이러한 거동을 상세히 관찰하기 위해 직접 가시화 사진을 Figure 6에 나타내었다. 화염 좌측 밑에 관찰되는 작은 화염 상은 반대편 창으로부터 반사된 상이다. Figure 6에서 알 수 있는 바와 같이 연료의 초임계 압력에서는 화염 선단 부에 인접한 미연 액적으로부터 활발하게 증발된 연료의 안개 상(mist image)들이 관찰되는데 이것은 OH 라디칼 화학 발광 상에서는 나타나지 않는 점으로부터 미연 액적으로부터의 증발된 연료의 안개 상이라는 것이 확실된다. 이러한 현상은 연료의 초임계 압력으로 분위기 압력이 증가하면 증발 잠열의 급격한 감소로 연료 증발율이 증가하기 때문이다.<sup>(1,10,12)</sup>

Figure 7a와 b는 각 분위기 압력 하에서 n-Decane의 액적 직경이 0.75mm, 1.0mm인 경우에 대해 액적 간격에 따른 화염 퍼짐율을 나타낸다. 각 데이터는 5회 실험에 대한 평균을 의미하며 에러 표시는 최대 및 최소 값들을 나타낸다. 액적 간격이 어떤 값 이상에서는 연소하는 액적으로부터의 열전달이 충분하지 않고 미연 액적의 점화 시간이 기연 액적의 연소 수명 시간 (combustion life time)보다 길어 화염이 전달되지 않는 한계 액적 간격(limit droplet spacing)이 존재한다. 액적 간격이 감소함에 따라 미연 액적은 기연 액적측의 화염대로 접근하면서 고온 가스층에 노출되고 증발 및 화학 반응이 촉진되어 화염 퍼짐율은 증가하게 된다. 결국 인접한 미연 액적 표면 근처의 기연 혼합기가 최대 온도의 분위기에 노출된다면 화염 퍼짐율이 최대가 될 것이 예측된다. 따라서, 최대 화염 퍼짐율은 화염 직경과 일치하는 액적 간격과 깊은 관련이 있다. 액적 간격을 그 이상 감소하면 인접한 미연 액적이 기연 액적의 화염 위치 안으로 접근하면서 미연 액적의 증발 잠열에 의한 냉각 효과로 인해

화학 반응율이 감소하게 되며 극단적으로 작은 액적 간격은 물리적으로 액적 풀(droplet pool)로 의 접근을 의미하므로 결국 화염 퍼짐율은 감소하게 된다. 기존의 연구들<sup>(6~8)</sup>에서 액적 간격의 증가에 따라 화염 퍼짐율이 단조 감소하는 경향만이 보고된 것은 액적 간격이 넓어 미연 액적이 기연 액적의 화염 위치의 밖에 있는 실험 조건에서만 실험이 수행되었기 때문이다. 결론적으로 액적 간격 사이에서의 화염의 상대적 위치에 화염 퍼짐율이 크게 의존하고 있음을 알 수 있다.

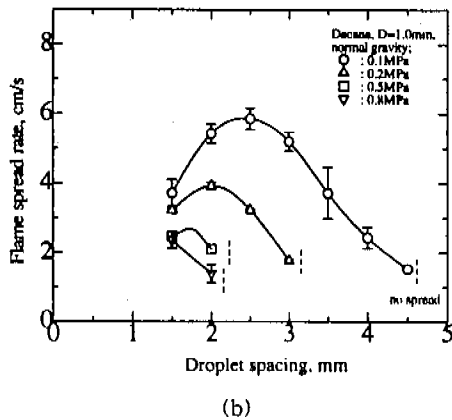
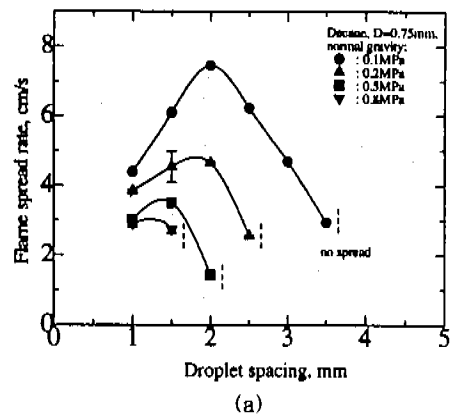


Fig. 7 Variation of Flame Spread Rate with Droplet Spacing; (a) D=0.75mm and (b) D=1.0mm.

단일 액적의 연소에 관한 연구들<sup>(9~11)</sup>에서 분위기 압력의 증가에 따라 증발된 연료의 가스 상 확산율(gas-phase diffusion rate)의 역제로 인한

화염 직경의 감소가 보고되었다. 분위기 압력의 증가에 의한 화염 직경의 감소는 고정된 액적 간격에 대해 미연 액적층의 단위 면적당 전달되는 열전달량의 감소를 의미한다. 따라서, Figure 7a와 b에 나타난 바와 같이 화염 퍼짐의 한계 액적 간격의 감소 및 화염 직경과 밀접한 관계를 나타내는 최대 화염 퍼짐율의 액적 간격이 감소하는 경향을 나타내고 화염 퍼짐율도 전체적으로 감소하게 된다. 동일 분위기 압력 하에서는 액적 직경이 큰 경우가 전체 액적 간격 범위에서 화염 퍼짐율이 더 작게 나타난다. 이것은 액적 직경이 클수록 열용량(heat capacity)이 커서 연료의 증발 시간이 증가하고 결국 점화 시간이 증가하기 때문이다<sup>(1,4,5)</sup>.

1.0mm인 경우에 대해 고정된 액적 간격 하에서 분위기 압력에 따른 화염 퍼짐율을 나타낸다. 분위기 압력이 증가함에 따라 화염 퍼짐율은 단조 감소하고 어떤 압력 이상에서는 화염이 인접 미연 액적으로 전달되지 않는 한계 압력(limit pressure)이 존재한다. 액적 간격이 증가함에 따라 화염 직경에 대한 액적 간격의 상대적 증가에 의해 화염 퍼짐의 한계 압력도 감소하게 된다. 모든 액적 간격에 대해 한계 압력은 연료의 아임계 압력에서 존재하지만 액적 직경이 1.0mm인 경우에는 액적 간격이 1.5mm에서, 0.75mm인 경우에는 액적 간격이 1.0mm에서 연료의 초임계 압력 범위로 화염 퍼짐이 확장된다. 이 경우에 있어서 분위기 압력이 3.0MPa 이하에서만 데이터를 표시한 이유는 다음과 같다. 고압 분위기하의 단일 액적의 연소에 관한 연구<sup>(6)</sup>에서 연료의 초임계 압력과 분위기 압력에서 액적 표면 온도가 연료의 임계 온도에 도달하기 위한 분위기 압력은 약 2배 이상이며 연소 수명 시간의 거의 끝에서 일어나는 것으로 보고된다. 현재의 실험에서도 3.0MPa 이상에서는 기연 액적들이 연소 수명 시간의 거의 끝에서 급격히 표면 장력이 줄어들어 연소실 바닥으로 떨어지는 현상이 발생하는 것으로부터 기연 액적 표면이 연료의 임계 온도에 도달하는 것으로 판단된다. 이러한 영향하에서 화염 퍼짐 및 화염 퍼짐의 한계 분위기 압력의 정확한 측정이 곤란하기 때문에 데이터 습득에서 제외하였다.

한편, 초임계 압력에서 화염 퍼짐이 존재하는 원인에 대해서는 현재의 상황에서 명확히 규정하는 것은 어렵지만 물리적 및 현상론적 배경으로부터 다음과 같은 설명은 가능하다. 이러한 조건에서의 액적 직경은 Fig. 7a와 b에 나타난 바와 같이 대기압 조건하에서 최대 화염 퍼짐율의 액적 직경에 비해 작아서 화염 직경보다 액적 간격이 작은 경우이다. 따라서, 다른 액적 간격의 경우와 비교하면 화염 퍼짐의 한계 분위기 압력은 더 큰 경향을 가지려 한다. 또한, 분위기 압력을 증가시키면 Fig. 6에서 관찰되는 바와 같이 연료 액적의 초임계 압력에서 미연 액적으로부터 증발된 연료의 안개 상(dust image of evaporated fuel)들이 급격히 증가하게 된다. 이것은 단일 액적의 증발에 관한 기존의 연구들에서 분위기 압력의 증가에 따라 연료의 증발량이 연료의 초임계 압

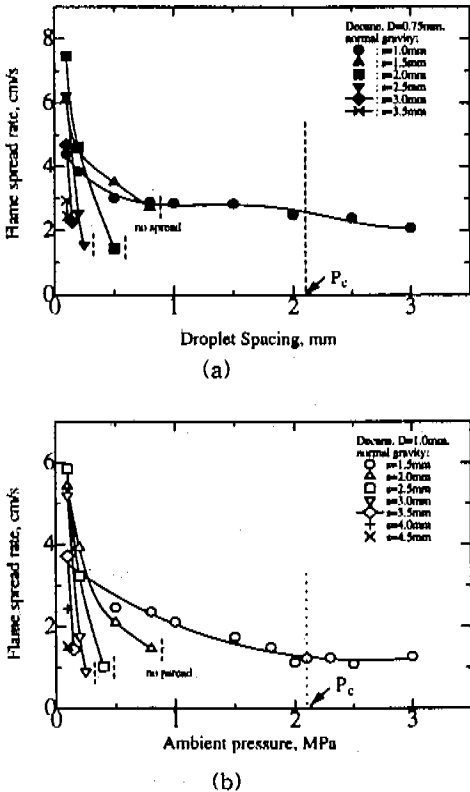


Fig. 8 Variation of Flame Spread Rate with Ambient Pressure at Fixed Droplet Spacings; (a) D=0.75mm and (b) D=1.0mm.

Fig. 8a와 b는 액적 직경이 각각 0.75mm 및

력들에서 급격히 증가하는 결과들과 일관된다<sup>(1,10,12)</sup>. 또한, 단일 액적 연료의 점화 시간은 주로 증발 시간에 의존하기 때문에<sup>(1-5)</sup>, 분위기 압력의 증가로 연료 증발량이 증가함에 따라 미연 액적 축 점화 시간이 감소되어 화염 퍼짐 시간은 감소하게 된다. 요약한다면, 액적 간격이 작기 때문에 화염 퍼짐의 한계 압력이 증가하려는 경향과 분위기 압력이 증가하여 액적 연료의 초임계 압력들에서 급격히 증가된 연료의 증발량에 의해 미연 액적 축 점화 시간이 짧아져 화염 퍼짐 시간이 감소하는 효과가 중첩되어 화염 퍼짐은 초임계 압력에서도 존재하게 된다.

#### 4. 결 론

연료의 초임계 압력으로 분위기 압력이 증가된 경우에 일차원 액적 배열에서의 화염 퍼짐에 관한 실험적 연구로부터 다음과 같은 결론이 얻어진다.

(1) 화염 퍼짐 거동은 대표적으로 연속적 모드와 간헐적 모드로 나눌 수 있다. 액적 간격이 작고 분위기 압력이 낮은 경우에 연속적 화염 퍼짐 모드가 나타나며 액적 간격이 증가하거나 액적 간격이 작은 경우에도 분위기 압력이 증가하면 화염 퍼짐은 간헐적 모드로 바뀐다.

(2) 고정된 분위기 압력 하에서 어떤 액적 간격 이상에서는 기연 액적의 연소 수명 시간 안에 열전달이 충분치 않아서 화염 퍼짐이 발생하지 않는 한계 액적 간격이 존재한다. 액적 간격이 줄어들면 기연 액적축으로 미연 액적이 접근하게 되면서 고온 가스층에 노출되어 점화 시간이 감소하기 때문에 화염 퍼짐율은 증가한다. 최대 화염율은 액적 간격이 화염 직경 근처에서 일치하는 경우에 나타나며 그 이상 액적 간격이 줄어들면 증발 잠열에 의한 냉각 효과에 의해 화염 퍼짐율은 감소하게 된다. 즉, 화염 퍼짐율은 액적 간격에 대한 화염의 상대적 위치에 크게 의존함을 알 수 있다.

(3) 고정된 액적 간격 하에서 분위기 압력이 어떤 압력 이상이면 화염 퍼짐이 발생하지 않는 한계 압력이 발생한다. 분위기 압력이 증가하면 화염 직경의 감소로 최대 화염 퍼짐율의 액적 간격이 감소하고, 액적 간격이 클수록 화염 퍼짐의 한계 압력은 감소한다. 그러나, 대기압 조건에서

화염 직경보다도 작은 액적 간격을 갖는 경우(현재의 연구에서는  $D=1.0\text{mm}, s=1.5\text{mm}$ 와  $D=0.75\text{mm}, s=1.0\text{mm}$ 의 경우)로부터 분위기 압력을 증가시키면 연료의 초임계 압력 범위에서도 화염 퍼짐이 발생하는데 이것은 연료의 초임계 압력에서 액적 표면 온도가 연료의 임계 온도에 도달하지 않았다 할지라도 미연 액적으로부터 연료의 증발량이 급격히 증가하여 점화 시간의 감소를 유도하여 화염 퍼짐 시간을 감소시켰기 때문이다. 이러한 경우에서의 화염 퍼짐에 관한 한계 압력의 존재 여부는 통상 증력장에서는 기연 액적 표면 온도가 연료의 임계 온도에 도달하는 순간 급격히 줄어든 표면 장력으로 기연 액적이 연소실 바닥으로 낙하하는 현상 때문에 정확히 평가되기는 힘들고 미소 증력하에서의 실험 등 많은 검증 작업이 요구된다.

#### 참고문헌

- (1) T. Tsukamoto and T. Nioka, 1993, Dynamics of Heterogeneous Combustion and Reacting Systems, Progress in Aeronautics and Astronautics, AIAA, Vol.152, p.263.
- (2) C.K. Law, 1975, Asymptotic Theory for Ignition and Extinction in Droplet Burning, Comb. Flame, Vol.24, p.89.
- (3) M. Mawid and S.K. Aggarwal, 1989, Chemical Kinetics Effects on the Ignition of a Fuel Droplet, Combust. Sci. and Tech., Vol.65, p.137.
- (4) R. Nakanishi, H. Kobayashi, S. Kato, and T. Nioka, 1994, Ignition Experiment of a Fuel Droplet in High-Pressure High Temperature Ambient, Twenty-fifth Symp.(Int.) on Comb., The Combustion Institute, p.447.
- (5) T. Nioka, T. Mitani, and J. Sato, 1984, Ignition Characteristic of a Two-Component Condensed Fuel in a Stagnation-Point Flow, Twentieth Symp.(Int.) on Comb., The Combustion Institute, p.1877.
- (6) R. Reichenbach, D. Squires, and S.S. Penner, 1962, Flame Propagation in Liquid-Fuel Droplet Arrays, Eighth Symp.(Int.) on Comb., The Combustion Institute, p.1068.



- (7) T.A. Brzustowski, A. Sobiesiak, and S. Wojcicki, 1981, Flame Propagation Along an Array of Liquid Fuel Droplets at Zero Gravity, Eighteenth Symp.(Int.) on Comb., The Combustion Institute, p.265.
- (8) S. Okajima, T. Kimoto, K. Abe, and S. Yamaguchi, 1989, JSME Trans.(B), Vol.47, No.422.
- (9) G.M. Faeth, D.P. Dominicus, J.F. Tulpinsky, and D.R. Olson, 1969, Supercritical Bipropellant Droplet Combustion, Twelfth Symp.(Int.) on Comb., The Combustion Institute, p.9.
- (10) A.R. Hall and J. Diederichsen, 1953, An Experimental Study of The Burning of Single Drops of Fuel in Air at Pressures Up to Twenty Atmospheres, Fourth Symp.(Int.) on Comb., p.837.
- (11) J. Sato, M. Tsue, M. Niwa, and M. Kono, 1990, Effects of Natural Convection on High-Pressure Droplet Combustion, Comb. Flame, Vol. 82, p.142.
- (12) J.A. Manrique and B.L. Borman, 1969, Calculation of Steady State Droplet Vaporization at High Pressures, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.12, p.1081.