

# 일차원 액적 배열의 화염 퍼짐에 있어서 연료의 혼합 효과에 관한 연구

박 정\* · 小林秀昭\*\* · 新岡嵩\*\*

## A Study on Blend Effect of Fuel in Flame Spread Along An One-Dimensional Droplet Array

Jeong Park, Hideaki Kobayashi and Takashi Niioka

**Key Words:** Flame spread(화염 퍼짐), Flame propagation(화염 전파), Continuous mode(연속적 모드), Intermittent mode(간헐적 모드), Ignition(점화)

### Abstract

Experimental investigation on flame spread of blended fuel droplet arrays has been conducted for droplet diameters of 1.0mm and 0.75mm using high-speed chemiluminescence images of OH radical. The flame spread rate is measured with blended fuel composition, droplet diameter, and droplet spacing. Flame spread is categorized into two: a continuous mode and an intermittent one. There exist a limit droplet spacing, above which flame does not spread, and a droplet spacing of maximum flame spread, which is closely related to flame diameter. It is seen that flame spread rate is mainly dependent upon the relative position of flame zone within a droplet spacing. In case of large droplet, the increase of % volume of Heptane induces the shift of limit droplet spacing to a larger spacing since volatile Heptane plays a role of an enhancer of flame spread rate. In case of small droplet, the increase of % volume of Heptane leads to the shift of limit droplet spacing to a smaller droplet spacing. This is so because of the delayed chemical reaction time by the rapid increase of mass flux of fuel vapor for small droplet.

### 1. 서론

\* 한국과학기술원 기계기술연구소

\*\* 東北大學 流體科學研究所

실제 분무 연소기의 초기 연소 특성을 파악하기 위해 많은 관심이 단일 액적의

점화[1-5], 일차원 및 이차원 액적 배열에서의 점화[6], 일차원 액적 배열에서의 화염 퍼짐[7-11] 등에 주어져 왔다. 그러나, 대부분의 분무 연소기에서 사용하는 액체 연료는 정제되어 있지 않아 광범위한 물리적·화학적 성질들에 의해 복잡한 현상을 낳는다. 따라서, 휘발성이 상이한 혼합 연료의 사용은 이러한 현상을 이해할 수 있는 기본적 수단을 제공하는 반면 소수의 연구들만이 점화 문제[12]를 다루었을 뿐 액적 배열 하에서 화염 퍼짐 거동에 대해서는 문헌상에 보고되지 않는다.

화염 퍼짐 거동은 크게 기연 액적의 연소와 미연 액적의 점화에 의해 영향을 받기 때문에 단일 액적의 점화 거동에 관한 정보는 화염 퍼짐율의 예측에 중요한 단서를 제공한다. 증발된 연료와 주위 산화제의 혼합기의 화학 반응 시간이 매우 짧다면 점화 시간은 거의 연료의 증발 시간만에 의존한다 할 수 있다. 그러나, 액적 연료가 점화하기 전에 완전히 증발하는 초기 액적 직경의 최소 점화 한계가 존재함이 보고된다[13,14]. 즉, 연료 증기의 질량 유속은 초기 액적 직경에 반비례하므로 작은 액적의 경우에 있어서 연료 증발 질량 유속이 급격히 증가하면 혼합기가 점화하지 못할 수도 있다. 결과적으로 이러한 효과는 점화 시간의 지연을 유발하며 특히 휘발성이 강한 연료에서 우세하게 나타나게 된다. 증유의 특성을 모사하기 위해 사용된 단일 액적 혼합 연료의 점화에 관한 실험들[12]에서 점화 시간이 최대가 되는 액적 직경이 존재함을 알았다. 한편, 일차원 액적 배열 하에서 화염 퍼짐에 관해서는 소수의 연구들이 보고된다. 대기압 분위기에서 화염 퍼짐 시간과 쉬리렌 상에 의해 정의된 침수 깊이(immersion

depth)와의 상관 관계가 보고되었다[7]. 미연 액적의 점화 지연 시간이 화염 전파 시간에 비해 훨씬 커서 액적 간격 내에서 화염 퍼짐율이 비균일함이 알려졌다[8]. 액적 연료의 아임계 압력 하에서 분위기 압력이 증가함에 따라 단조 감소하고, 액적 간격과 분위기 압력의 변화에 따라 화염 퍼짐 거동은 두 가지 대표적인 모드(mode)를 갖는다는 것이 보고되었다[9]. 즉, 연속적인(continuous) 화염 퍼짐 모드는 액적 간격이 작고 저압에서 관찰되며 간헐적인(intermittent) 화염 퍼짐 모드는 액적 간격이 크고 고압에서 나타난다. 대기압으로부터 연료의 초임계압력까지 분위기 압력이 변하는 일차원 액적 배열의 화염 퍼짐에 관한 통상 증력 및 미소 증력 실험들[10,11]에서 압력이 증가함에 따라 화염 퍼짐율은 통상 증력에서는 단조 감소하지만, 미소 증력하에서는 최소와 최대점이 존재하며 화염 퍼짐 시간은 압력의 증가에 따른 화염 직경의 감소로 인한 열경계층의 전달 시간의 증가 효과와 미연 액적으로부터 증발율의 증가로 인한 점화 시간의 감소 효과의 경쟁에 의해 결정됨이 보고되었다.

현재의 연구에서는 대기압 분위기에서 일차원 액적 배열의 화염 퍼짐에 관한 실험을 통해 액적 크기 및 혼합 연료의 효과가 평가된다. 액적 직경이 1.0mm와 0.75mm인 n-Heptane과 n-Hexadecane의 혼합 연료의 조성과 액적 간격에 따라 화염 퍼짐율은 OH 라디칼의 고속 화학발광상(high-speed chemiluminescence image of OH radical)을 이용하여 측정된다.

## 2. 실험 장치 및 방법

Figure 1은 실험 장치도를 나타낸다. 장치는 크게 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. 연소실 내부는 내경 260mm, 길이 410mm, 두께는 20mm이다. 연소실에는 50mm 직경의 두 개의 관찰 창을 갖는다. 한 개의 창은 OH 라디칼의 화학 발광 상을 얻기 위해 석영 유리로 하고, 반대편 창은 미소 주사기가 액적 연료를 서스펜더에 공급하는 과정을 CCD 카메라로 관찰할 수 있도록 파이렉스 강화 유리로 구성하였다.

미세한 액적 간격 조정의 용이성을 위해 내부 각이  $135^\circ$ 를 유지하도록 두 번 구부러진다. 연료 공급 계는  $50\mu\text{l}$ 의 내부 용적을 갖는 미소 주사기와 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 7개의 서스펜더에 액적 연료를 공급하는데 걸리는 시간은 약 3분이다. 사용된 연료는 n-Hexadecane( $n\text{-C}_{16}\text{H}_{34}$ ,  $T_b=560\text{K}$ )과 n-Heptan( $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ ,  $T_b=371.6\text{K}$ , )이다.

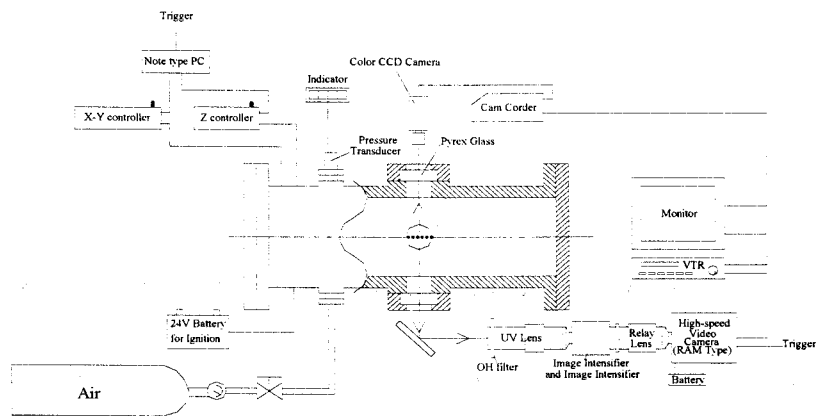


Figure 1. Schematic Drawing of Experimental Apparatus

Figure 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 세라믹 관에 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

서스펜더에 공급된 액적은 타원형이며 검정된 등가 직경은 다음과 같은 식으로 얻어진다[1,4,5,10,11,12].

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

여기서  $D_1$ ,  $D_2$ 는 각각 단경과 장경을 나타내고 공급된 액적 직경의 최대 측정에러는  $\pm 3.4\%$ 이다. 점화기(igniter)를 위한 가열 선은 0.3mm의 칸탈선이고 0.7초

간 8A가 공급되면 첫 번째 액적이 점화하여 미연 액적층으로 화염이 전달된다. 화염 퍼짐율은 Figure 1에 보여진 바와 같이 화상 증폭기가 탑재된 고속 CCD 카메라에 의해 OH 라디칼 화학 발광 상으로부터 측정된다. 노출 시간은 1/600s이고, 간섭필터의 중심 파장은 307nm, 반치폭은 11.4nm이다.

7개이고 화염 퍼짐을 측정에 사용되는 액적 간격 구간은 점화 원의 영향과 비대칭성의 문제가 있는 마지막 액적 간격 구간을 제외한 3-5이다. 한편, n-Heptane은 대기 조건에서 휘발성이 강하여 50% n-Heptane을 초과하여 혼합 연료를 만들면 서스펜더에 연료를 공급하는 동안에 초기 액적 연료들이 증발

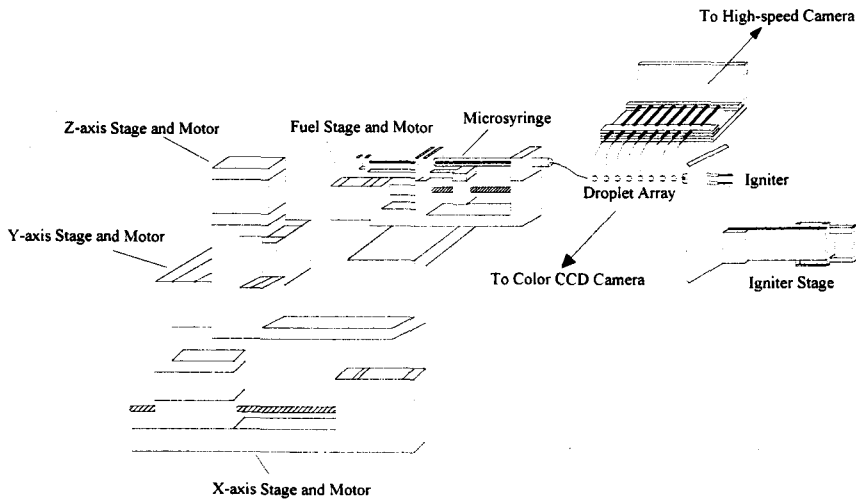


Figure 2. Schematic Drawing of Droplet Generation System

Figure 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 나타나므로, 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

하여 액적 직경이 시간에 따라 변하기 때문에 액적 크기가 변하지 않는 50% n-Heptane + 50% n-Hexadecane으로 연료 혼합을 제한하였다.

### 3. 실험 결과 및 논의

Figure 4는 액적 간격이 큰 경우와 작은 경우에 있어서 대표적인 화염 퍼짐 거동의 OH 라디칼 화학 발광 상을 나타낸다. 사진에서 우측 상단에 표시된 시간은 점화원에 전류가 공급되는 순간과 동기된 신호가 고속 카메라에 주어지는 시간을 기준 시간 영(zero)으로 하는 경과 시간을 나타낸다. Figure 4b에 나타

난 바와 같이 액적 간격이 큰 경우에 있어서는 화염 퍼짐은 간헐적 모드를 나타낸다. 즉, 화염은 한정된 시간 동안 액적 간격 안의 거의 고정된 위치에서 체류하면서 열전달에 의해 인접한 미연 액적(unburnt droplet)의 증발을 촉진시킨다.

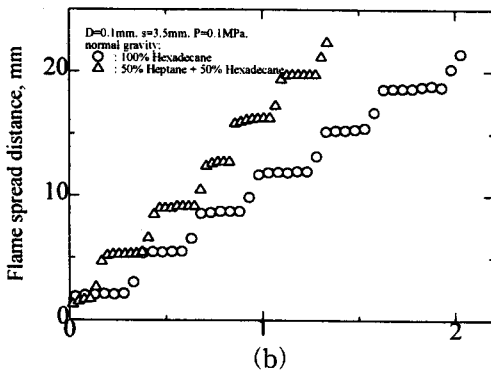
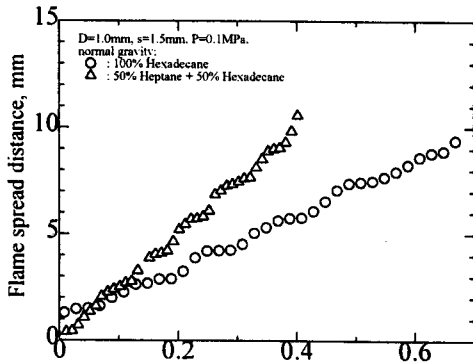


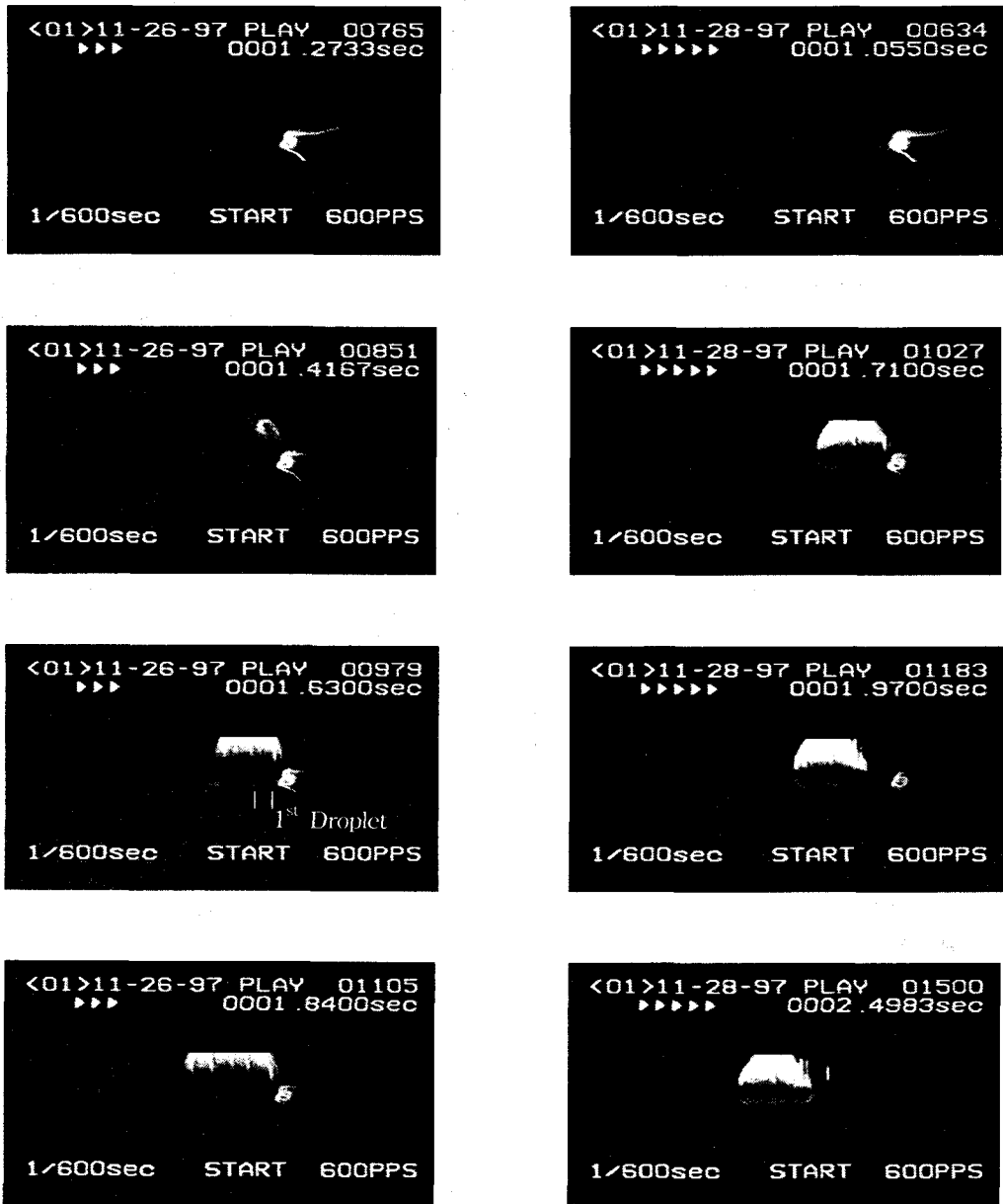
Figure 3. Variation of Flame Spread Distance with Time;  $D=1.0\text{mm}$ , (a)  $s=1.5\text{mm}$  and (b)  $s=3.5\text{mm}$

미연 액적 주위의 가연 혼합 층의 일부가 점화한 후 화염은 급히 가연 혼합층 내를 전파하여 미연 액적 주위에 형성된다. Figure 3b에 나타난 바와 같이 화염 퍼짐 거리가 짧은 시간 동안 급격히 증가하는 구간은 미연 액적 주위에서의 화

염 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 가연 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 감소하면 Figure 4a에서 보여지는 바와 같이 미연 액적은 상대적 높은 가스층에 노출되어 액적 간격 사이에서 화염의 체류 시간이 감소하게 되고 액적 간격이 그 이상으로 감소하면 화염의 액적 간격 사이에서 일정한 화염 거리 구간이 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. 한편, 이상의 관찰로부터 화염 퍼짐 시간( $t_s$ )은 다음과 같이 표현될 수 있다[10,11].

$$t_s = t_f + t_i = t_f + t_{th} + t_d \quad (2)$$

여기서,  $t_i$ 는 미연 액적 주위의 가연 혼합기의 점화 시간,  $t_f$ 는 가연 혼합기의 일부가 점화한 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 일부가 점화하기까지의 물리적 및 화학적 점화 지연 시간( $t_d$ )으로 나눌 수 있다.



(a)

(b)

Figure 4. Typical Chemiluminescence Image of OH Radical of Flame Spread;  $D=1.0\text{mm}$ , (a)  $s=1.5\text{mm}$  and (b)  $s=3.5\text{mm}$

Figure 3a으로부터 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 기연 액적으로부터의 열전달이 증가하게 되어  $t_i$ 는 점점 작아지게 된다. 따라서, 연속적 화염 퍼짐 거동은 간헐적 모드로부터  $t_i$ 의 감소에 기인하여 나타나게 된다.

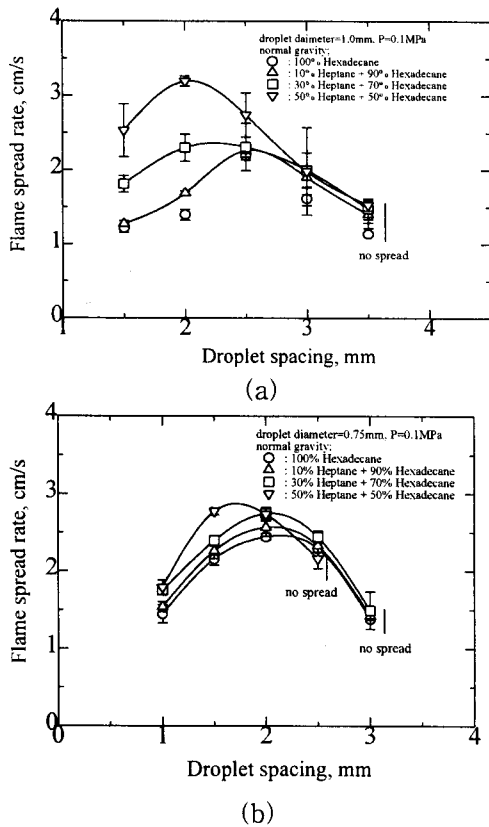


Figure 5. Variation of Flame Spread Rate with Droplet Spacing; (a) D=1.0mm and (b) D=0.75mm

Figure 5는 1.0mm, 0.75mm의 액적 직경의 경우 Heptane과 Hexadecane의 각 조성비에 대해 액적 간격에 따른 화염 퍼짐율을 나타낸다. 오차 표시는 5회의 실험에 대한 최대와 최소를 나타낸다. 액적 간격이 커지면 기연 액적으로부터 열전달이 충분하지 않아 미연 액적이 점화하지 않는 한계 액적 간격이 존재한다. 액적 간격이 감소함에 따라 미연 액적은 기연 액적 주위의 고온 가스층에 노출되어 화염 퍼짐율은 증가한다. 따라서, 미연 액적이 고온 가스층의 최대 온도에 노출된다면 화염 퍼짐율이 최대가 될 것이 예측되며 이것은 액적 간격이 화염 반경과 근사적으로 일치하는 경우에 나타나게 된다. 액적 간격이 그 이상으로 감소하면 화염 퍼짐율은 다시 감소하게 된다. 이것은 미연 액적이 화염대안에 위치함을 의미하고 액적 간격이 계속 감소하는 것은 액적 풀(droplet pool)로의 접근을 의미하므로 증발 잠열에 의한 냉각 효과에 의해 화염 퍼짐율은 감소하게 된다. 결과적으로 화염 퍼짐율은 액적 간격 사이에서 화염대의 상대적 위치에 민감하게 의존하고 있음을 알 수 있다. 한편, Heptane % 부피를 증가시키면 최대 화염 퍼짐율의 액적 간격이 감소하는 방향으로 이동한다. 일반적으로 화염대의 위치는 화학 양론비 선(stoichiometric line)에서 형성되며, Hexadecane에 대한 Heptane의 화학 양론 몰비는 11/24.5가 된다. 이것은 Hexadecane의 경우 액적 표면으로부터 화염까지의 거리가 Heptane에 비해 큰 것을 의미하므로 Heptane % 부피를 증가함에 따라 화염 직경이 감소하고 Figure 5에 나타난 바와 같이 최대 화염 퍼짐율의 액적 직경은 감소하는 방향으로 이동하게 된다.

일반적으로 액적 연료의 크기와 휘발성은 점화 시간에 증대한 영향을 주며, 단일 연료의 점화 시간은 증발 시간과 화학 반응 시간으로 표현된다[12]. 액적 연료가 크거나 휘발성이 작은 경우에 있어서는 액적 연료의 표면 온도가 비등점(boiling point) 근처에 이르기까지 증발이 거의 이루어지지 않다가 활발한 증발이 순간적으로 나타나기 때문에 혼합과 화학 반응 시간은 무시될 수 있다. 따라서, 이러한 경우의 점화 시간은 주로 증발 시간에 지배를 받게 된다. 작은 액적 연료 혹은 휘발성이 강한 경우에 있어서는 상황은 반대가 된다. 이러한 경우에 있어서는 연료와 산화제가 혼합하고 반응하는데 오랜 시간을 요하게 되어 물리적으로 Damkohler No.가 감소함을 의미한다. 따라서, 이러한 경우에 있어서는 점화 시간에 있어서 화학 반응 시간을 무시할 수 없게 된다. 일반적으로 액적의 단위 시간당 증발율( $\dot{w}$ )은 액적 직경( $d$ )에 비례하고, 액적 표면적( $s$ )은  $d^2$ 에 비례하므로 질량 유속(mass flux),  $\dot{m}$ 은 액적직경에 반비례한다( $\dot{m} = \dot{w}/s \sim 1/d$ ). 이것은 액적 직경이 작을수록 질량 유속이 커져 화학 반응을 위해서는 시간이 요구됨을 의미한다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 전체적으로 Heptane % 부피를 증가시키면 화염 퍼짐율이 증가함을 알 수 있다. 이것은 Heptane % 부피를 증가함에 따라 미연 액적으로부터 연료의 증발이 촉진되어 식(2)의 점화 시간을 감소시키기 때문이다. 그러나, 액적 직경이 1.0mm인 경우에 비해 0.75mm인 경우에 있어서 Heptane % 부피를 증가시키면 화염 퍼짐율의 증가하는 정도가 완만해짐을 알 수 있다. 이것은 Heptane % 부피를 증가시키면 증발을 촉진시키

는 반면 전술한 바와 같이 액적 직경이 작아지면 연료 증기의 질량 유속이 급격히 증가하기 때문에 화학 반응 시간이 길어지게 된다. 따라서, 휘발성이 강한 연료의 과도한 증발은 오히려 점화 지연 시간을 지체시켜 화염 퍼짐율이 제약을 받음을 알 수 있다.

한편, 연료 조성의 효과를 조사하기 위해 화염 직경과 관련되는 최대 화염 퍼짐율의 액적 직경에 대한 한계 액적 간격을 Table 1에 나타내었다. 앞서 지적한 바와 같이 화염 퍼짐율은 액적 간격 내에서 화염대의 상대적 위치에 의존함을 보였고, 결과로써 연료 조성의 효과를 명확히 보이기 위해 최대 화염 퍼짐율의 액적 간격에 대한 한계 액적 간격의 비로 나타내었다. 액적 직경이 큰 1.0mm의 경우에 있어서 Heptane % 부피를 증가시키면 한계 액적 간격은 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 Heptane % 부피의 증가에 의해 증발이 촉진되면 상대적으로 점화 가능한 혼합층을 확장시키는 역할을 하기 때문이다. 그러나, 액적 직경이 작은 0.75mm의 경우에 있어서는 Heptane 30%까지는 한계 액적 간격이 변화가 없으나 Heptane 50%에서 한계 액적 간격이 감소한 것을 알 수 있다. Heptane 30%까지는 한계 액적 간격이 변화가 없는 것은 현재의 실험에서 액적의 서스펜더 간격을 조정하는 지그의 분해능이 0.5mm이기 때문에 미세한 변화를 검지하지 못한 것으로 여겨진다. 그러나, 한계 액적 간격이 Heptane 50%에서 감소하는 것은 액적이 작은 경우에 있어서 Heptane % 부피를 증가시키면 연료 증기의 질량 유속이 급격한 증가로 점화 지연 시간이 길어져 식(2)에서 알 수 있듯이 화염 퍼짐 시간이 증가하기 때문이다.



Table 1. Limit droplet spacing with fuel composition.

D (mm)	% Hexadecane	% Heptane	$s^*$ (mm)	$s_c/s^*$
1.0	100	0	2.5	1.50
	90	10	2.5	1.50
	70	30	2.25	1.67
	50	50	2.0	1.88
0.75	100	0	2.0	1.63
	90	10	2.0	1.63
	70	30	2.0	1.63
	50	50	1.75	1.57

( $s^*$  : 최대 화염 퍼짐율의 액적 간격,  
 $s_c$  : 한계 액적 간격)

요약한다면 액적 직경이 작은 경우에 있어서는 Heptane은 휘발성이 높기 때문에 쉽게 증발하여 액적 표면 근처에는 Hexadecane의 농도가 높다. 더욱이, 질량 유속이 상대적으로 커서 Heptane에 의한 점화는 어렵게 된다. 따라서, 점화 과정은 Hexadecane에 의해 지배를 받게 되어 화염 퍼짐율은 상대적으로 제약을 받는다. 액적 직경이 큰 경우에 있어서는 질량 유속이 점화 지연을 유발할 정도로 크지 않기 때문에 Heptane의 증발은 화염 퍼짐율을 증가시키는 역할하게 된다. 즉, 이러한 경우에 있어서는 점화 과정은 Heptane에 의한 지배를 받게 된다.

#### 4. 결론

Heptane과 Hexadecane의 혼합 연료

를 사용한 일차원 액적 배열의 화염 퍼짐에 관한 실험으로부터 다음과 같은 결론이 얻어진다.

1) 화염 퍼짐 거동은 대표적으로 연속적 모드와 간헐적 모드로 나눌 수 있다. 액적 간격이 작은 경우에 연속적 화염 퍼짐 모드가 나타나며 액적 간격이 큰 경우에는 화염 퍼짐은 간헐적 모드로 바뀐다.

2) 화염 퍼짐율은 액적 간격 내에서의 화염대 위치에 크게 의존한다. 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 액적층으로 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.

3) 액적 직경이 큰 경우에 Heptane % 부피를 증가시키면 미연 액적의 증발을 촉진시켜 상대적으로 점화 가능한 혼합층을 확장시키는 역할을 함으로써 한계 액적 간격이 증가한다. 액적 직경이 작은 경우에 Heptane % 부피를 증가시키면 연료 증기의 질량 유속이 급격히 증가하여 점화 지연 시간이 길어져 화염 퍼짐 시간이 증가하기 때문에 Heptane 50%의 경우 오히려 한계 액적 간격이 줄어들게 된다. 결론적으로, 액적 직경이 작은 경우에 있어서는 Heptane은 휘발성이 높기 때문에 쉽게 증발하여 액적 표면 근처에는 Hexadecane의 농도가 높다. 더욱이, 질량 유속이 상대적으로 커서 Heptane에 의한 점화는 어렵게 된다.

따라서, 점화 과정은 Hexadecane에 의해 지배를 받게 되어 화염 퍼짐율은 상대적으로 제약을 받는다. 액적 직경이 큰 경우에 있어서는 질량 유속이 점화를 지연 유발할 정도로 크지 않기 때문에 Heptane의 증발은 화염 퍼짐율을 증가시키는 역할하게 된다. 즉, 이러한 경우에 있어서는 점화 과정은 Heptane에 의한 지배를 받게 된다.

### 참고문헌

1. T. Tsukamoto and T. Niioka, 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. Niioka, 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. Niioka, 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. T. Kadowaki, K. Maruta, S. Hasegawa, H. Kobayashi, and T. Niioka, 1997, 微小重力における液滴の着火実験, *日本マイクログラヒティ應用學會誌*, Vol. 14, No.1, p.17.
7. 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.
8. 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.
9. S. Okajima, T. Kimoto, K. Abe, and S. Yamaguchi, 1989, *JSME Trans.(B)*, Vol.47, No.422.
10. 박 정, 신현동, 小林秀昭, 新岡嵩, 1998, 일차원 액적 배열하에서 화염 퍼짐에 관한 연구, *대한기계학회논문집* accepted for publication.
11. 박 정, 신현동, 小林秀昭, 新岡嵩, 1998, 통상 및 미소 중력의 초임계 압력하에서 일차원 액적 배열의 화염 퍼짐 거동의 비교 연구, *대한기계학회논문집* accepted for publication.
12. M. Takeji, T. Tsukamoto, and T. Niioka, 1993, Ignition of Blended-Fuel Droplet in High-Temperature Atmosphere, *Comb. Flame*, Vol. 93, p.149.
13. T. Niioka, M. Takahashi, and M. Izumikawa, 1981, Gas-Phase Ignition of A Hot Stagnant-Point Flow, *Eighteenth Symp.(Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, p.741.
14. T. Saitoh, S. Ishiguro, and T.

Niioka, 1982, An Experimental Study of Droplet Ignition Characteristics Near the Ignitable Limit, *Comb. Flame*, Vol. 48, p.27.