

액적배열연소의 상호간섭에 관한 실험적 연구

김흥식* · 백승욱† · 박준성*

(2001년 1월 19일 접수, 2002년 7월 9일 심사완료)

An Experimental Study About Interaction of Droplet Array Combustion

Heung Sik Kim, Seung Wook Baek and Jun Sung Park

Key Words : Single Droplet (단일액적), Droplet Array (액적배열), d^2 -law (액적지름 제곱법칙), Burning Rate (연소율), Burning Lifetime (액적생존시간), Critical State (임계상태)

Abstract

An experimental study was conducted to investigate the interaction phenomena of droplet array combustion in ambient environment. The droplet with 1mm in diameter was supported from an optical fiber and ignited with a hot wire. Combustion lifetimes and burning rate constants were measured for fuel of n-heptane according to parameters, which were junction and suspender spacings, and array configuration. Results show that the burning process considerably depends on the initial array configuration. The d^2 -law is found to be correct when applied to both of the droplets in array and the single droplet. For separation distance of about 5mm, there exists a critical state. So the transition from a merged flame to separated flames occurs and burning velocity is much faster than before. Combustion lifetime of the lower droplet is shorter than that of the upper droplet in the two-dimensional array combustion. Burning rate constants of the droplets in arrays are smaller than that of the single droplet, while they become higher as separation distance increases. Combustion lifetimes of the droplets in arrays are longer than that of the single droplet and decrease as separation distance increase. It is concluded that the array configuration and the mergedness of the flame are the most important factors governing multi-droplet combustion.

1. 서론

액적 연소는 액적 또는 액막이 불안정성에 의하여 부서지면서 일어나는 연소 현상을 다루는 것으로 가열, 증발, 점화, 연소의 4 단계로 구분할 수 있으며, 이러한 일련의 연소 과정을 규명함으로써 연료가 사용되어지는 연소시스템의 정량적인 해석이 가능하게 된다. 과거에는 연료 분무에 대하여 결국 각각의 액적 집합이라는 사실을 기초로 하여, 단일 액적의 연소에 대해서 집중적인 연구를 실시하였다. 그러나, 분무 내에서의 액적은 증발과 연소를 거치는 동안 이웃에 있는 액적들과 끊임없이 상호 작용을 통하여 단일 액적만이 공간상에 위치

할 때와는 사뭇 다른 현상을 나타내게 된다. 더욱이 복잡한 시스템에서는 연료 분무의 특성은 단일 부분만으로는 설명할 수 없고 단일 부분들이 어떻게 상호 작용을 하느냐에 따라서 해석될 수 있다.

액적 연소에 관한 연구는 1950 년대에 시작되었는데, 연소과정 중 액적 지름의 감소는 시간에 대해 지름의 제곱과 선형 관계가 있다는 d^2 -law 에 그 뿌리를 두고 있다. 단일 액적에 대한 연구로서 Kobayasi⁽¹⁾는 고온 환경에서 단일 액적의 연속 촬영 실험을 통해 연소 과정에 대한 해석을 수행하였고, Canada 와 Faeth⁽²⁾는 100 기압에 이르는 고압 환경에서 여러 연료를 이용하여 연소율을 측정하였다. Nakanishi 등⁽³⁾은 고온·고압 환경을 구현하여 점화 실험을 수행하였으며, Law 등⁽⁴⁾은 저압 환경에서 기체 조성비를 달리하여 실험과 계산 연구를 수행하였다. 연료 성분을 달리하여 수행한 연구로서 Marchese 와 Dryer⁽⁵⁾가 메탄올과 물을 일정

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : swbaek@sorak.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3714 FAX : (042)869-3710

* 한국과학기술원 기계공학과

비율로 섞어 수치해석 연구를 하였으며, Mikami 등⁽⁶⁾은 n-heptane 과 n-hexadecane 을 이용하여 고압, 미소중력(microgravity) 환경에서 실험하였다.

한편, Rex 등⁽⁷⁾이 시초가 된 액적 배열 연구에서 Mikami 등⁽⁸⁾은 미소 중력 환경에서 두 개의 액적 배열 실험을 하였고, Miyasaka 와 Law⁽⁹⁾는 세 개의 액적 선형 배열 실험을 통해 단일 액적의 특성과 비교하였다. 또한, Brzustowski 등⁽¹⁰⁾은 무중력 상태(zero gravity)에서 두 개와 세 개의 액적 선형 배열의 화염 전파(flame propagation)에 대하여 각각 연구하였다. 그리고 Labowsky⁽¹¹⁾는 액적을 1 차원, 2 차원, 3 차원으로 배열시켜 각각의 상호작용에 따른 연소율을 수치해석을 통해 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 n-heptane(C_7H_{16})을 연료로 이용하여 상온, 상압 환경에서 단일 액적과 더불어 선형 배열에 대한 실험을 액적 간의 거리를 다양하게 변화시키며 진행한 후, 2 차원 액적 모델을 정의하여 이 역시 다양한 조건 하에서 실험하였다. 연속 촬영 실험을 통해 얻은 영상 자료를 이용하여 d^2 -law 를 만족하는지 알아보고 각각의 성향을 비교 분석하였다. 또한, 연소율 계산과 액적 간의 거리에 따른 액적 생존 시간을 각각의 경우에서 측정된 다음 비교하여 액적의 상호 간섭 효과에 대한 규칙성을 언급할 수 있는 결과를 도출하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구의 액적 배열 연소 현상을 알아보기 위해서 사용된 실험 장치의 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다. 액적은 직경 0.1mm 의 광섬유(optical fiber)를 사용해서 매달았으며, 지지대에 세라믹을 이용

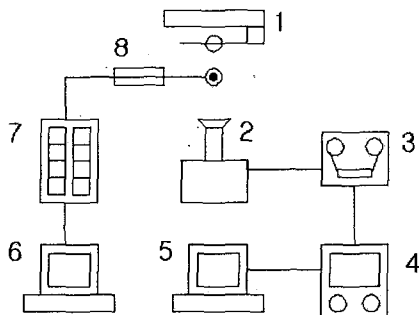


Fig. 1 Schematic of the experimental setup (1) suspender (2) CCD camera (3) VCR (4) monitor (5) PC (image processor) (6) PC (data processor) (7) A/D converter (8) thermocouple

하여 접합점(junction)을 만들어줌으로써 연소 전후에 액적의 위치가 일정하게 유지되도록 했다. 액적을 지지대에 위치시키는 투하기(releaser)로는 피하 주사기(hypodermic syringe)를 사용하였으며, 액적을 연소시키기 위한 점화 방법으로는 저항 코일 점화 방법을 이용하였다. 저항 코일의 재료는 80% 니켈과 20% 크롬으로 이루어진 니크롬선으로 작은 고리(loop)를 수번 감아 저항을 높여 사용했다. 액적의 점화 시기와 지름 변화 추이의 측정은 CCD 카메라(Sony 8mm CCD-V5000 : 30 frames/s)를 이용하여 획득한 화상을 PC 내에서 이미지 소프트웨어(Data Translation, Global Lab)를 이용하여 처리하였다.

2.2 실험 방법

액적은 피하 주사기를 사용하여 n-heptane 을 지지대 접합점에 초기 액적 지름이 $1 \pm 0.05mm$ 가 되도록 매달았으며, 이를 위해서 비디오 카메라를 이용하여 확대 영상을 통해서 액적의 크기를 조절하였다. 액적의 점화는 저항 코일을 이용한 열선에 의해서 이루어지며, 2V 의 전압이 가해지면 약 1 초 후에 점화된다. 액적 점화를 위해 열선은 액적 아래 0.2mm~0.5mm 의 위치에서 가열되며, 액적이 점화된 다음 열선을 즉시 제거하여 액적 점화에 대한 열선의 영향을 방지하도록 하였다.

액적 연소과정은 CCD 카메라를 이용하여 확대된 이미지를 녹화한 후, VCR 을 재생하여 화상처리장치 또는 모니터를 통하여 액적의 변화과정을 관찰하였다. 초기 액적 지름은 화상처리장치를 이용하여 측정하였으며, 액적의 가열, 증발 및 점화 등의 연소과정은 필요에 따라 VCR 의 정지 화면을 이용하여 관찰하였다. 액적의 크기를 측정할 때, 지지대인 광섬유의 직경이 0.1mm 라는 사실을 화상 처리 시에 액적의 크기를 측정하는 기준 값으로 사용하였다. 즉, 이의 직경을 나타내는 화상의 화소(pixel)를 분석해서 액적의 크기를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단일 액적

Fig. 2 은 단일 액적의 경우 점화 후 시간에 따른 액적 크기 변화를 표현한 그래프이다. d^2 -law 를 따르는 경향을 살펴볼 수가 있는데, 본 실험에서 얻은 그래프와 함께 Kobayasi⁽¹⁾의 결과도 비교를 위해 함께 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 Kobayasi 실험 결과의 액적 크기가 시간에 대해

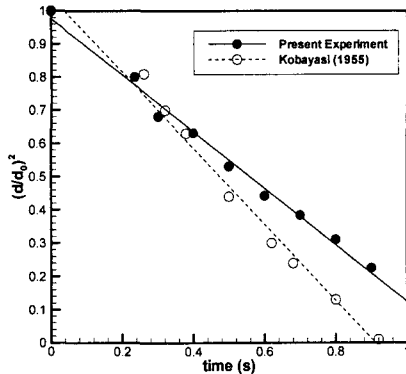


Fig. 2 Droplet radius-squared history for fuel of heptane



Fig. 3 Difference of junction points : (a) horizontal direction (b) vertical direction

더 빨리 줄어든다는 것을 알 수 있다.

본 실험결과와 다른 경향이 나타나는 이유는 점화 방법의 차이인데, 본 실험에서는 점화 장치를 이용한 실험을 하여 점화가 일어나면 점화 장치를 액적 근처에서 곧바로 제거한 반면, Kobayasi의 실험에서는 액적 점화를 위해서 액적 주위의 온도를 고온으로 만들어 실행한 것으로 점화 후에도 계속 고온이 유지되기 때문에 액적이 더 빨리 연소되는 것이다.

한편, 액적은 완전한 구형이라기보다는 타원형에 가깝게 광섬유에 맺힌다. 따라서, 액적 직경을 측정할 때 구형으로 가정하고 데이터를 측정하면 적지않은 오차가 발생하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 액적 직경 측정 시에 Kobayasi⁽¹⁾의 논문에서 소개한 타원형에서 구형으로의 전환 공식을 이용하였다. 즉, 타원형의 장축을 a , 단축을 b 라고 두었을 때 수학적인 방법으로 구형의 직경 D 를 다음과 같이 이끌어 낼 수 있다.

$$D = \sqrt[3]{ab^2} \quad (1)$$

Fig. 3 에서는 광섬유의 방향에 따라 액적의 맺힌 모양이 다르다는 것을 보여주고 있다. 액적이 지지대의 끝에 맺혀 세로로 고정되어 졌을 때에는 아래로 중력의 영향을 받아 장축이 세로축이 되는 타원형이 된다. 그러나, 접합점이 지지대 중간에

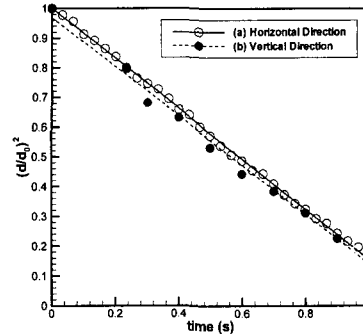


Fig. 4 Comparison of droplet radius-squared histories : (a) horizontal direction (b) vertical direction

위치하여 가로로 맺힐 때에는 장축이 가로축이 되나 중력의 영향을 받아 좀더 구형에 근접한 모습을 보이게 된다. 이러한 이점을 살려 액적 배열 실험은 지지대 중간에 접합점을 만들어 실행하였다. 접합점 위치에 따른 액적 연소의 차이를 알아보기 위해 각각의 d^2 -law 를 그려 Fig. 4 에서 비교해 보았다. 그래프에서 알 수 있듯이 (a)의 경우에도 d^2 -law 를 잘 만족하고 있으며, 또한, (a)와 (b) 사이에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 한편 Fig. 4 의 (a)경우 d^2 -law 그래프에서 연소율을 계산해 보면 약 $0.844 \text{ mm}^2/\text{s}$ 의 값을 갖는데, 이는 Goldsmith가 실험에서 얻은 n-heptane 의 연소율 $0.84 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 와 일치하는 값이다.⁽¹²⁾

3.2 액적 배열

3.2.1 이중 액적 배열

지지대에 접합점을 두 개 만들어 액적 배열에 대한 본 실험을 수행하였다. 촬영한 이미지를 Fig. 5 에 나타내었는데, (a)-(b)는 접합점 사이 간격이 $L=2\text{mm}$ 일 때의 화염 형상이다. 두 개의 액적이 하나의 화염을 형성하므로 단일 액적의 화염보다 많은 연료를 포함하고 있으며, 각 액적을 연소시키기 위한 산소의 공급이 단일 액적보다는 원활하지 못하기 때문에 연소 시간이 길어진다. (c)-(d)는 $L=5\text{mm}$ 일 때의 연소 과정을 나타낸 것인데, 연소 초반에 화염이 하나였다가 중반으로 가면서 각각의 액적 화염으로 나뉘는 현상을 볼 수 있다. 이때를 임계 상태로 정의하였다. (e)-(f)는 $L=8\text{mm}$ 일 때의 연소 과정을 나타낸 사진이며, 이 때에는 화염이 연소 초반부터 확실히 둘로 나뉘어 진행된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6 에서는 L 이 각각 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm, 8mm 인 경우에 실험한 결과를 모두 종합하여 단일 액적일 때와 함께 d^2 -law 를 나타낸 그래프

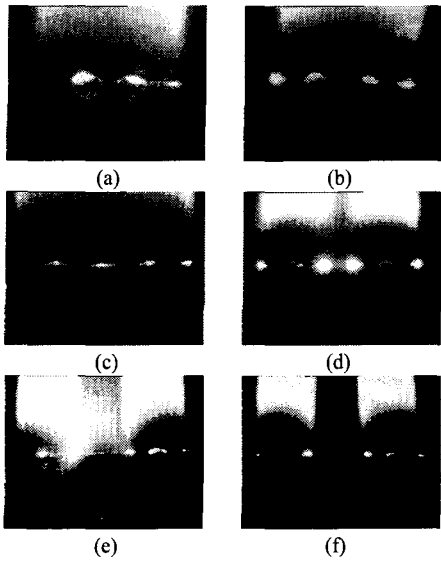


Fig. 5 Photographs of the flames (L : junction spacing) (a)-(b): $L=2\text{mm}$, (c)-(d): $L=5\text{mm}$, (e)-(f): $L=8\text{mm}$

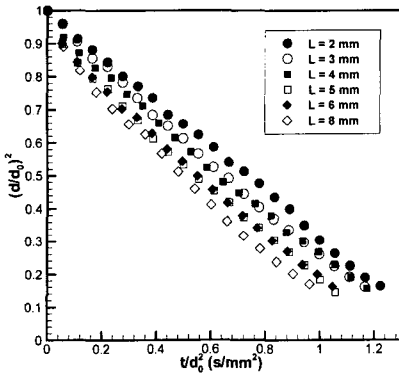


Fig. 6 Temporal variation of droplet diameter squared double droplets

이다. 두 액적이 가까이 있을 때에는 각 액적이 화염과 닿는 표면적이 감소하여 산소를 받아들이는 면적이 단일 액적인 경우에 비해 현저히 줄어들게 되어 연소가 더 오래 지속된다. 특히, 하나의 화염(merged flame)으로 연소 반응이 진행되면 두 액적이 마주보는 부분은 화염 표면과 맞닿을 수 없게 되므로 그 영향은 더 크다. 액적 간의 거리가 넓어져 간격이 5mm 일 때부터 화염은 둘로 나뉘어지는데, 이 때에는 어느 정도 산소 공급이 원활해지지만 두 화염 사이의 공간이 작아져서 산소 부족(oxygen starvation)현상이 일어난다. 두 액적 간의 거리가 더 넓어져 8mm 에 이르게 되면 액적은 각각의 화염으로 둘러싸여 연소 반응이 진행된다. 이 때에는 화염 사이의 공간도 늘어나게 되어 산소 공급이 원활해진다. 특히 두 액적 사이의 자연 대류가 강화되면서 화염으로의 산소 공급이

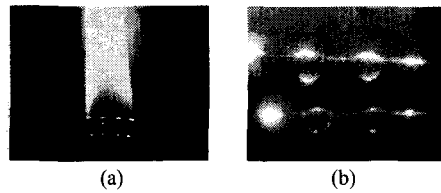


Fig. 7 Burning shape of double droplets in tandem ($L=H=3\text{mm}$)

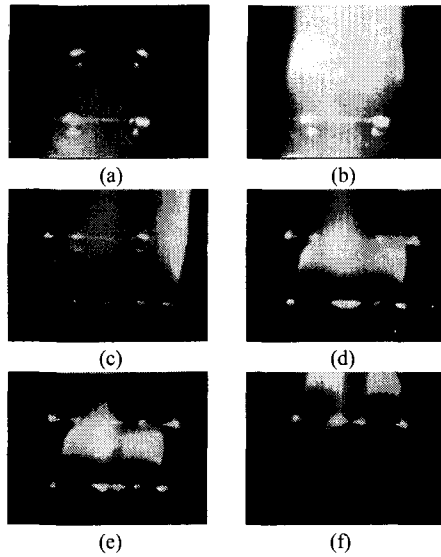


Fig. 8 Droplet burning sequences ($L=H=5\text{mm}$)

더욱더 원활히 이루어진다.⁽⁸⁾ 하지만, 이러한 경우라도 이중 액적은 단일 액적보다는 늦게 연소가 진행된다는 것을 그래프 비교를 통해 알 수 있다.

3.2.2 상하에 위치한 이중 액적 배열

지금까지의 실험은 선형 즉, 1 차원에서 액적의 상호간섭을 알아보는 것이었다. 이제부터는 2 차원에서의 상호간섭에 대해서 알아보기로 한다. 앞에서 실시한 두 개의 액적 배열에서 위 부분에 두 개의 액적 배열을 설치하여 2 차원 모델을 만들었다. 앞선 실험에서는 변수가 두 액적 간의 거리(L) 뿐이었지만, 현재 실험에서는 이와 더불어 두 지지대 사이의 거리(H)가 변수로서 작용한다.

Fig. 7 에서는 $L=3\text{mm}$, $H=3\text{mm}$ 일 때의 이미지를 나타낸 것이다. (a)는 화염을 중심으로, (b)는 액적을 위주로 촬영한 것이다. Fig. 8 에서는 간격이 $L=5\text{mm}$, $H=5\text{mm}$ 인 경우의 액적 연소 과정을 보여주고 있다. 사진에서 알 수 있듯이 위쪽에 위치한 액적의 연소 시간이 오래 지속되는데, 이는 아래 액적이 위 액적에 비해서 액적이 화염 표면과 닿는 부분이 많아 산소의 공급이 원활하기 때문이다

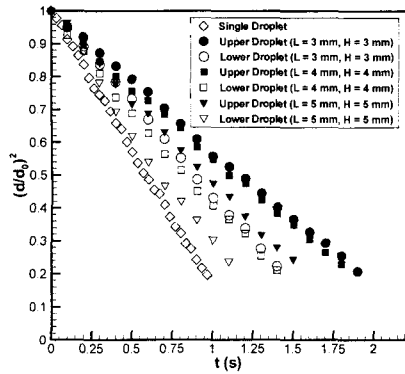


Fig. 9 Burning histories of double droplets in tandem

Fig. 9는 $L(=H)$ 이 3mm, 4mm, 5mm 인 경우 시간에 따른 액적 크기 변화를 단일 액적의 경우와 함께 나타낸 것이다. 넓어진 거리만큼 산소를 더 많이 받아 들일 수 있기 때문에 간격이 넓어질수록 연소가 빠르게 진행되는 현상에는 변함이 없다. 하지만, 그래프에서 $L=H=3\text{mm}$, $L=H=4\text{mm}$ 인 경우에 비해 $L=H=5\text{mm}$ 일 때에는 기울기의 차이가 좀 더 확연하다는 것을 알 수 있다. 앞선 이중 액적에서의 결과를 보면 $L=5\text{mm}$ 일 때를 임계 상태로 정의하였는데 이는 화염이 둘로 나뉘는 변화가 일어나는 시점이기 때문이다. Fig. 8 을 보면 하나이던 화염이 연소가 진행되면서 각각의 액적에 대한 단일 화염으로 나뉘어지는 현상을 관찰할 수 있다. 선형 액적에서와 마찬가지로 임계 상태의 영향이 2 차원에서 그대로 나타나고 있음을 알 수 있다. 한편, 상하에 위치한 이중 액적 배열의 경우에서도 단일 액적의 경우보다 연소가 오래 지속됨을 알 수가 있다.

Fig. 10 에서 $L=5\text{mm}$, $H=10\text{mm}$ 일 때의 액적 연소 과정을, Fig. 11 과 12 에서는 $H=10\text{mm}$ 일 때의 연소율과 액적 생존 시간을 앞선 $L=H$ 인 경우에서의 아래쪽에 위치한 액적들과 비교하여 보여주고 있다. $H=10\text{mm}$ 인 경우가 연소율이 높으며, 생존시간이 짧음을 알 수 있다. 즉, 지지대 사이의 간격이 점점 좁아지는 간격과 마찬가지로 연소 속도에 영향을 준다는 사실을 알 수 있는데, H 가 클수록 산소 공급이 더 원활히 잘 이루어진다.

Fig. 10 에서 확인할 수 있듯이 $L=5\text{mm}$ 의 경우 기울기의 변화가 좀 더 눈에 띈다는 것을 알 수 있는데, 이는 화염 변화가 일어나는 임계 상태이기 때문이다. 또, 단일 액적의 경우와 비교를 해보면 앞선 $L=H$ 인 경우에 비해 연소속도 차이가 작게 나는 것을 알 수 있는데, L 이 늘어날수록 점점 단일 액적의 값에 근접해갈 것으로 예상된다.

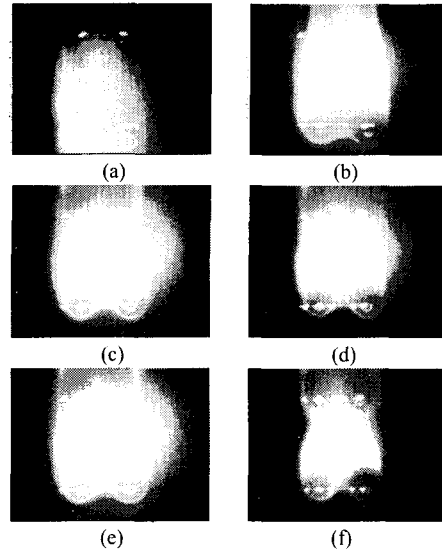


Fig. 10 Droplet burning sequences ($L=5\text{mm}$, $H=10\text{mm}$)

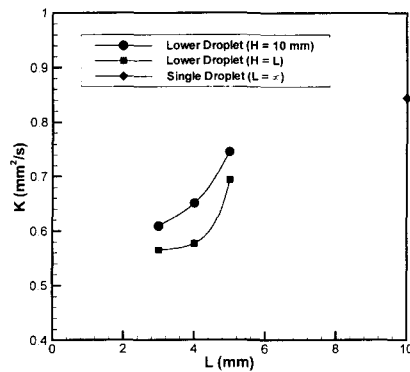


Fig. 11 Burning rate for double droplets in tandem (lower droplet)

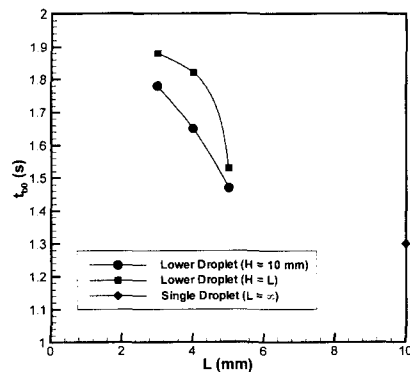


Fig. 12 Burning lifetime for double droplets in tandem (lower droplet)

한편, 지지대 사이 간격이 10mm 가 되면 위에 위치한 액적은 화염에 휩싸이기 때문에, 촬영한 이미지를 통해 데이터를 측정하기가 불가능하였다.

3.2.3 상하에 위치한 단일 액적 배열

단일 액적 두 개를 서로 다른 두 지지대에 매달아 아래위로 배치한 다음 연소 실험을 실시하였다. 여기서 사용된 변수는 두 지지대 간의 거리 (H)가 된다. Fig. 13 (a)-(c)는 $H=3\text{mm}$ 일 때 액적의 시간에 따른 일련의 연소과정을 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 아래에 위치한 액적이 화염 아래 부분과 맞닿아 있어 산소를 더 많이 받아 들일 수 있으므로, 위에 위치한 액적보다 빠르게 연소 현상이 진행된다. (d)-(g)는 $H=5\text{mm}$ 인 경우의 액적 연소 과정이다. 여기서 앞의 (a)-(c)와

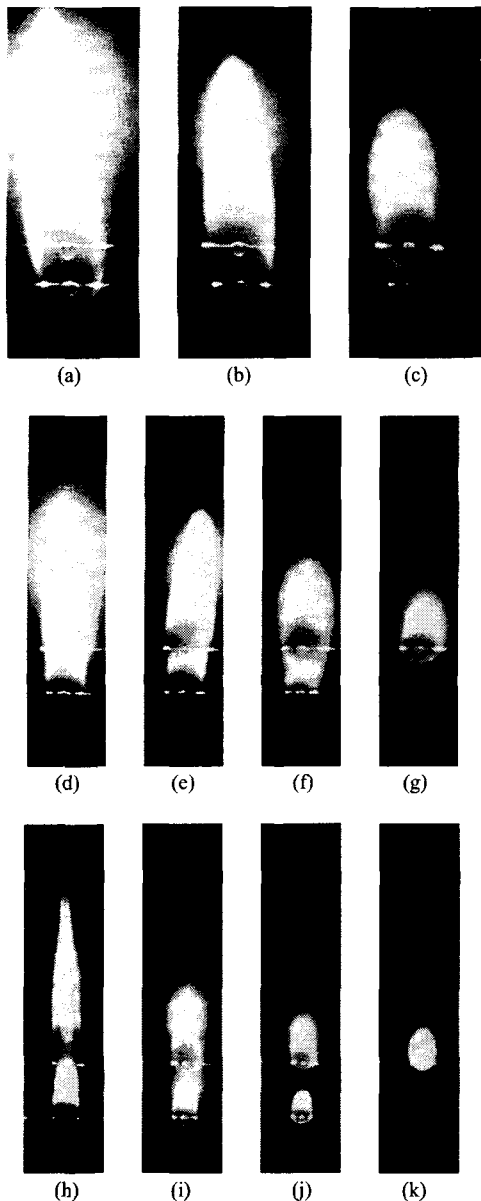


Fig. 13 Flame burning sequences of one droplet in tandem

비교해 보면 $H=3\text{mm}$ 인 경우에는 아래에 위치한 액적이 소화될 때 하나의 화염이 그대로 유지되지만, $H=5\text{mm}$ 에서는 반응이 진행되면서 하나의 화염이 각 액적의 개별 화염으로 나뉘어진다는 것을 알 수 있다. 앞에서 언급한 이중 액적, 상하에 위치한 이중 액적 배열의 경우와 비교해보면, $H=5\text{mm}$ 에서 임계 상태가 존재한다는 동일한 사실을 이끌어 낼 수가 있다. 지지대 사이 거리를 10mm 로 하여 실험한 결과를 (h)-(k)에 화염 변화 추이로 나타내고 있는데, 여기에서는 화염이 나뉘어지는 현상을 보다 선명하게 확인할 수 있다. Fig. 14 에서는 상하에 위치한 단일 액적 배열에 대한 d^2 -law 를 보여주고 있으며, 임계 상태의 구분을 뒷받침해 준다

3.2.4 삼각형 액적 배열 모델

2 차원 액적 배열에서 삼각형 모양을 구현하여, 세 개의 액적을 가지고 실험을 실시해 보았다. Fig. 15 (a)-(b)는 $L=H=3\text{mm}$ 일 때, 액적을 중심으로 화염의 형태를 촬영한 것이다. 상하에 위치한 이중 액적 배열의 경우와 마찬가지로 하나의 화염에서 모든 반응이 이루어짐을 확인할 수 있으며, 아래에 위치한 액적 화염이 먼저 사라짐(blow-off)을 알 수 있다. $L=H=5\text{mm}$ 일 때의 액적 연소 과정은 (c)-(d)에 나타나 있다. 흥미롭게도 앞의 모든 경우에서와 마찬가지로 소화되기 전에 개별 화염으로 나뉘어지는 현상을 관찰할 수 있다. (e)-(f)는 $L=H=8\text{mm}$ 일 때의 연소 과정인데, 이때에는 점화 순간부터 개별 화염으로 갈라져서 반응이 진행됨을 알 수 있다. 여기서 실험한 결과들을 단일 액적의 경우와 함께 Fig. 16 에 d^2 -law 로 나타내었다. 한편, 삼각형 액적 배열 모델에서는 임계 상태 이후부터 아래에 위치한 액적의 개별 화염으로 인해 위에 위치한 액적이 가려져 관찰할 수 없게 된다.

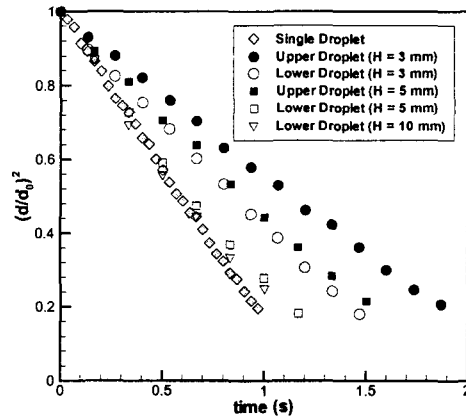


Fig. 14 Droplet burning histories of one droplet in tandem

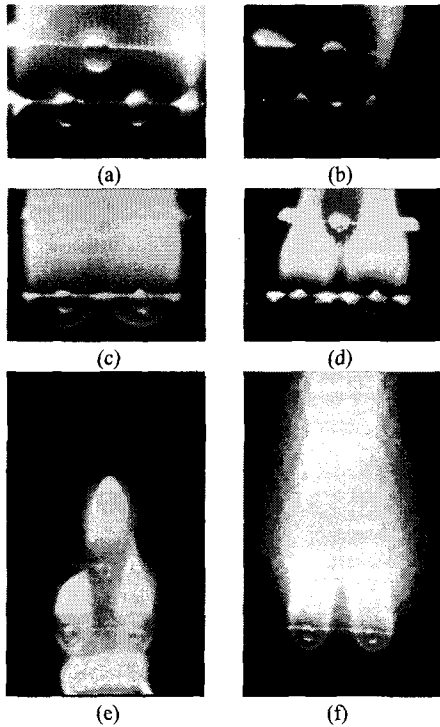


Fig. 15 Droplet burning sequences of triangle shape model

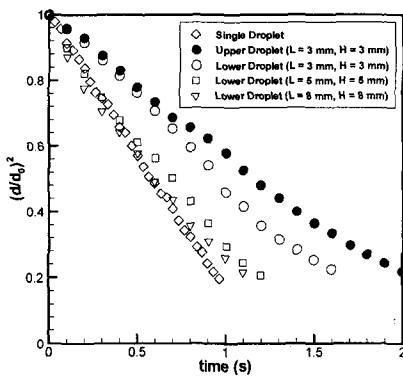


Fig. 16 Burning histories of triangle shape model

3.2.5 역삼각형 액적 배열 모델

3.2.4 의 경우와 반대로 역삼각형 모양을 구현하여 실험을 수행하였다. Fig. 17 (a)-(b)은 $L=H=3\text{mm}$ 일 때 액적 중심으로 액적 연소 과정을 촬영한 사진이다. 삼각형 액적 배열 모델의 경우와 같이 하나의 화염 안에서 모든 반응이 이루어지며, 아래에 위치한 액적 화염이 먼저 사라짐(blow-off)을 알 수 있다. (c)-(d)는 $L=H=5\text{mm}$ 일 경우 액적 형상 변화를 보여주고 있다. 개별 화염의 등장으로 역시 임계 상태의 단서를 제공하고 있다. (e)-(f)는 $L=H=8\text{mm}$ 일 경우의 연소 과정으로 점화부터 소화 때까지 세 개의 개별 화염이 각각 형성된다.

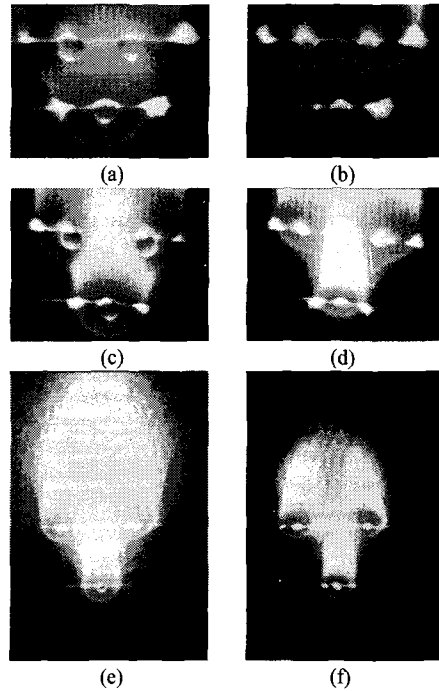


Fig. 17 Droplet burning sequences of inverted triangle model

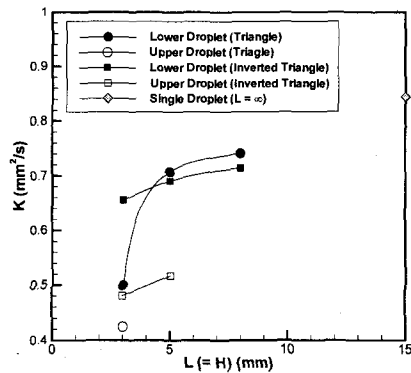


Fig. 18 Comparison of burning rates between triangle and inverted triangle shape models

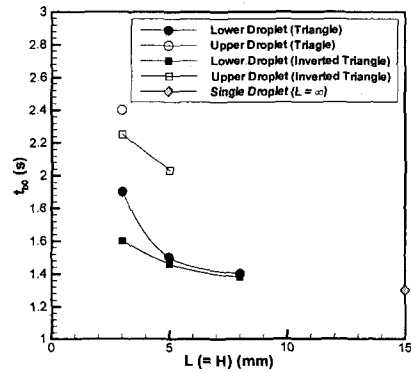


Fig. 19 Comparison of burning lifetimes between triangle and inverted triangle shape models

Fig. 18 과 19 에서는 앞선 두 모델의 연소율과 액적 생존 시간을 비교해 보았다. 연소율 측면에서 보면 $L=3\text{mm}$ 의 경우 두 모델의 연소율 차이가 큼을 알 수 있으며, $L=5\text{mm}$ 이후부터는 비슷해진다. 이는 역삼각형 액적 배열 모델에서 아래에 위치한 액적이 하나이고 위에 위치한 액적이 둘이기 때문에, 연소시키는 연료의 양뿐만 아니라 화염 표면으로부터 받을 수 있는 산소의 양적인 면에서 유리하게 분포되어 있기 때문이다. 물론, 이러한 경향은 임계 상태 이후부터는 희미해지는데 개별 화염이 나타나 연소 속도에 큰 차이가 없어지기 때문이다. 또한, 위에 위치한 액적은 아래에 위치한 액적의 연소 시간차로 인해 역삼각형 액적 배열 모델이 보다 빨리 연소되며, 큰 연소율을 가진다.

3.3 액적 생존 시간 비교

앞의 실험에서 구한 액적 배열 모델들의 액적 생존 시간을 단일 액적의 경우와 비교해 보았다. Fig. 20 에서는 단일 액적과 함께 이중 액적, 상하에 위치한 단일 액적, 그리고 역삼각형 액적 배열 모델의 액적 생존 시간이 각각 나타나 있다. 1 차원인 이중 액적의 생존 시간은 다른 2 차원 배열인 두 모델의 위에 위치한 액적과 아래에 위치한 액적의 생존 시간 사이에 위치한다. 2 차원인 두 모델의 아래 액적이 하나라는 점에서 이는 합당한 결과로 볼 수 있다.

아래 액적들의 비교를 보면 $L=3\text{mm}$ 에서 역삼각형 액적 배열 모델이 상하에 위치한 단일 액적보다 빨리 연소 됨을 알 수 있고 이는 임계 상태를 넘으면서 비슷해진다. 그리고, 모든 액적 배열들의 생존 시간은 액적 사이의 거리가 길어질수록 단일 액적에 가까워진다.

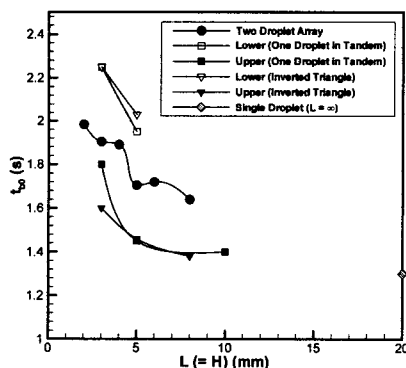


Fig. 20 Comparison of burning lifetimes of double droplets, one droplet in tandem and inverted triangle shape model

4. 결론

지금까지 상압에서 단일 액적의 연소, 그리고 몇 가지 모델의 액적 배열에서 상호 간섭 효과에 대한 연소 실험을 실시하여 결과를 분석해 보았으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 상압에서 단일 액적의 연소는 $d^2\text{-law}$ 를 따른다. 또한, 액적 배열의 연소에서도 1 차원이나 2 차원을 이루는 각각의 개별 액적들은 $d^2\text{-law}$ 를 따른다.

(2) 상압에서 지름이 1mm 인 액적 배열에서는 액적 사이의 거리가 대략 5mm 일 때 임계 상태가 존재한다. 이 때에는 점화 시에 하나의 화염으로 시작되지만, 연소 과정 도중에 각각의 액적에 따른 개별 화염으로 나뉘어지면서 소화되고 이전의 분리 거리 때보다 급격한 반응 속도를 나타낸다.

(3) 상압 중력 환경에서 실시한 모든 2 차원 액적 배열 연소 실험에서 아래에 위치한 액적이 위쪽에 위치한 액적보다 액적 생존 시간이 짧다.

(4) 상압의 모든 액적 배열에서 개별 액적들의 연소율은 단일 액적의 연소율보다 낮으며, 분리 거리가 커질수록 단일 액적의 연소율에 접근한다. 이와 마찬가지로 상압의 모든 액적 배열에서 개별 액적들의 액적 생존 시간은 단일 액적의 액적 생존 시간보다 길며, 분리 거리가 커질수록 단일 액적의 액적 생존시간에 접근한다.

마지막으로 본 연구에서 살펴본 액적 상호 간섭 효과는 희박기체(rarified gas) 영역에서는 액적 상호 간섭 효과를 분석하는 데에는 직접적으로 사용될 수 있으며, 밀집기체(densed gas) 영역에서는 단순화된 모델로 나누어 간섭효과를 분석할 수 있다. 따라서, 본 연구의 내용이 스프레이 연소에 대한 기초 연구로서 유용하게 적용될 것이라고 예상한다.

후기

본 논문은 과학기술부 기관고유사업(과제명 : 로켓엔진내의 산화제 분무 및 연소 현상)의 지원을 받았으며, 관계자 여러분의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kobayasi, K., 1955, "An Experimental Study on the Combustion of a Fuel Droplet," *Proceedings of the Fifth International Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, pp.141~148.
- (2) Canada, G. S. and Faeth, G. M., 1973, "Fuel Droplet

- Burning Rates at High Pressures," *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, pp.1345~1354.
- (3) Nakanishi, R., Kobayashi, H., Kato, S. and Niioka, T., 1994, "Ignition Experiment of a Fuel Droplet in High-Pressure High-Temperature Ambient," *Proceedings of the Twenty-Fifth International Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, pp.447~453.
- (4) Law, C. K., Chung, S. H. and Srinivasan, N., 1980, "Gas-Phase Quasi-Steadiness and Fuel Vapor Accumulation Effects in Droplet Burning," *Combustion and Flame*, Vol.38, pp.173~198.
- (5) Marchese, A. J. and Dryer, F. L., 1996, "The Effect of Liquid Mass Transport on the Combustion and Extinction of Bicomponent Droplets of Methanol and Water," *Combustion and Flame*, Vol.105, pp.104~122.
- (6) Mikami, M., Kono, M., Sato, J., Dietrich, D. L. and Williams, F. A., 1993, "Combustion of Miscible Binary-Fuel Droplets at High Pressure under Microgravity," *Combustion Science and Technology*, Vol.90, pp.111~123.
- (7) Rex, J. F., Fuhs, A. E. and Penner, S. S., 1956, "Interference Effects During Burning in Air for Stationary n-Heptane, Ethyl Alcohol, and Methyl Alcohol Droplets," *Jet Propulsion*, Vol.26, pp.179-187.
- (8) Mikami, M., Kato, H., Sato, J. and Kono, M., 1994, "Interactive Combustion of Two Droplets in Microgravity," *Proceedings of the Twenty-Fifth International Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, pp.431~438.
- (9) Miyasaka, K. and Law, C. K., 1981, "Combustion of Strongly-Interacting Linear Droplet Arrays," *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, pp.283~292.
- (10) Brzustowski, T. A., Sobiesiak, A. and Wojcicki, S., 1981, "Flame Propagation along an Array of Liquid Fuel Droplets at Zero Gravity," *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, pp.265~273.
- (11) Labowsky, M., 1980, "Calculation of the Burning Rates of Interacting Fuel Droplets," *Combustion Science and Technology*, Vol.22, pp.217-226.
- (12) Kanury, A. M., *Introduction to Combustion Phenomena*, Gordon and Breach Science Publishers, pp.178~180.