

미소 중력의 초임계압하에서 일차원 액적배열내의 화염퍼짐에 관한 연구

박 정 · 신현동(한국과학기술원) · 小林秀昭 · 新岡嵩(東北大學)

1. 서 론

분무 연소에 있어서 점화 및 화염 퍼짐(flame spread) 특성에 관한 연구는 다양한 부하에 대한 화염 안정성의 측면에서 매우 중요하다. 그러나, 실제 분무 연소에서의 초기 연소 특성은 유체역학적, 열역학적 및 화학 반응 과정뿐만 아니라 액적 간의 상호 작용 등 복잡한 현상에 의해 실제적 이해가 제한되어 왔다. 단일 액적에 대한 점화 특성의 연구[1-5]가 분무 연소기 내에서의 점화 기구를 이해하는데 많은 기여를 해왔지만, 연소기내의 초기 연소 특성에 대한 이해의 증진을 위해서는 화염 퍼짐 거동에 대한 많은 이론적·실험적 접근들이 요구된다. 이러한 관점에서 일차원 액적 배열은 화염 퍼짐 거동을 체계적으로 이해할 수 있는 유용한 수단을 제공함에도 불구하고 소수의 실험적 연구들만이 보고되었다[6-8].

대기압 분위기에서 화염 퍼짐 시간과 쉬리렌 상에 의해 정의된 침수 깊이(immersion depth)와의 상관 관계가 보고되었다[6]. 미연 액적의 점화 지연 시간이 화염 전파 시간에 비해 훨씬 커서 액적 간격 내에서 화염 퍼짐율이 비균일함이 알려졌다[7]. 액적 연료의 임계 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[8]. 즉, 연속적인(continuous) 화염 퍼짐 모드는 액적 간격이 작고 저압에서 관찰되며 간헐적인(intermittent) 화염 퍼짐 모드는 액적 간격이 크고 고압에서 나타난다. 이상의 문헌 조사로부터 기존 연구들이 연료의 초임계 압력 범위에서의 화염 퍼짐 거동을 관찰한 바는 없다. 한편, 단일 액적의 점화 시간은 분위기 압력의 증가에 따라 단조 감소하는 것이 보고되었고[2,3,4], 연료의 임계 압력에서 연소 수명 시간과 연소율은 분위기 압력의 증가에 따라 증가된 가스화(gasification)율과 감소된 가스상(gas-phase) 확산율의 중첩 효과에 의해 각각 최소와 최대를 나타냄이 알려졌다[9,10,11]. 따라서, 연료의 임계 압력 근처에서의 액적 배열하에서의 화염 퍼짐 거동에 관심이 집중된다.

화염 존재에 따른 자연 대류의 유·무에 따라 화염 퍼짐 거동이 크게 다를 것이 예측된다. 미소 중력(microgravity)에서는 기연 액적 주위에 형성된 구형 열 경계층이 시간에 따라 기연 액적으로부터 미연 액적으로 전달되고, 가스 혼합층의 일부가 점화한 후 기연 혼합층을 화염 전파한 후 화염이 미연 액적 주위에 발달한다. 통상 중력(normal gravity)에서는 자연 대류에 의해 기연 액적 주위의 고온 가스는 상방향으로 흐름이 유도되어 액적 배열 방향으로의 열경계층의 전달을 제한한다. 결과로써, 화염 퍼짐은 통상 중력에서는 한계 화염 퍼짐이 존재하는 반면 미소 중력에서는 화염 퍼짐이 발

생하지 않을 수도 있다. 현재의 연구에서 통상 및 미소 중력하에서 초임계 압력까지 분위기 압력이 확장된 경우에 있어서 화염 퍼짐 거동이 조사된다.

2. 실험 장치 및 방법

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

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 미세한 액적 간격 조정의 용이성을 위해 내부 각이 135° 를 유지하도록 두 번 구부러진다. 연료 공급 계는 50 μl 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 검정된 등가 직경은 다음과 같은 식으로 얻어진다[1,4,5,8].

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

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 칸탈 선이고 0.7초간 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 1/400s이고, 간섭필터의 중심 파장은 307nm, 반치폭은 11.4nm이다. 액적 주위의 증발 연료의 안개상(mist image)를 관찰하기 위해 컬러 CCD 카메라에 의한 직접 가시화가 사용된다.

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 나타난다. 화염 퍼짐율은 시간에 따른 화염 퍼짐 거리의 일차식의 기울기에 의해 결정되고, 측정에 사용되는 액적 간격 구간은 점화 원의 영향과 비대칭성의 문제가 있는 마지막 액적 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.

현재의 실험은 일본 土岐시 소재의 무중량종합연구소(MGLAB)의 낙하 설비를 이용하여 미소 중력에서 수행되었다. 자유 낙하 거리와 시간은 각각 100m, 4.5s이다. 실험 장치가 탑재된 캡슐이 낙하하기 전에 서스펜더에 연료가 미리 공급되고, 점화기와 고속 ICCD 카메라에 대한 입력 신호는 미소 중력 감지 신호에 동기된다.

3. 실험 결과

Figure 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 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 감소하면서 미연 액적은 고온 가스에 노출되어 점화 시간은 감소한다. 결국, Figure 3a에 나타난 바와 같이 일정한 화염 퍼짐 거리 구간은 사라지고 화염 퍼짐은 연속적으로 증가하고 Figure 4b에 보여진 바와 같이 연속적 화염 퍼짐 모드를 나타낸다.

Figure 5는 통상 중력 및 미소 중력에서 액적 간격에 따른 화염 퍼짐율의 변화를 나타낸다. 예러 표시는 5회 실험에 대한 최소와 최대를 나타낸다. 미연 액적의 점화 시간이 기연 액적의 연소 수명 시간보다 길어 화염 퍼짐이 존재하지 않는 한계 액적 간격이 존재한다. 액적 간격이 점차 감소하면서 미연 액적은 고온 가스에 노출되면서 연료 증발과 화학 반응이 촉진되어 화염 퍼짐율은 증가하게 된다. 따라서, 미연 액적 근처 가연 혼합기가 최대 가스 온도에 노출되면 화염 퍼짐율은 최대가 되므로 최대 화염 퍼짐율의 액적 간격은 화염 직경과 관련된다. 그 이상으로 액적 간격이 감소하면 인접 미연 액적이 화염대의 내부로 접근하게 되고 극단적 액적 간격

의 감소는 액적풀(droplet pool)을 의미하므로 증발 잠열에 의한 냉각 효과에 의해 화학 반응율이 감소하면서 화염 퍼짐은 감소하게 된다. 결과적으로 액적 간격내의 상대적 화염 위치에 화염 퍼짐율이 의존함을 알 수 있다. 한편, $D=1.0\text{mm}$ 의 경우 미소 중력에서는 한계 액적 간격이 10.25mm 이고 통상 중력에서는 4.75mm 이다. 이것은 통상 중력의 경우는 자연 대류에 의해 고온 가스가 상방향으로 흐름이 유도되어 열경계층의 액적 배열 방향으로의 전달을 제약하기 때문이다. 액적 직경이 큰 경우가 작은 경우에 비해 화염 퍼짐율이 작은 이유는 큰 액적의 경우는 상대적으로 열용량이 커서 연료 증발 시간이 길어져 점화 시간이 증가하기 때문이다[1,4,5].

Figure 6은 통상 중력의 각 분위기 압력 하에서 n-Decane의 액적 직경이 0.75mm , 1.0mm 인 경우에 대해 액적 간격에 따른 화염 퍼짐율을 나타낸다. 단일 액적의 연소에 관한 기존 연구[9-11]들에서 분위기 압력이 증가함에 따라 증발 연료의 가스상 확산율이 감소하여 화염 직경이 감소하는 것이 보고된다. 화염 직경의 감소는 미연 액적 단위 면적 당 흡수되는 열전달량의 감소를 의미하므로 화염 퍼짐의 한계 액적 간격 및 최대 화염 퍼짐율의 액적 간격은 감소하게 된다.

Figure 7은 대기압 분위기에서 연속적인 화염 퍼짐을 나타내는 액적 간격($D=1.0\text{mm}$, $s=1.5\text{mm}$)으로 고정시키고 분위기 압력을 증가시키면서 OH 라디칼 화염 발광에 의한 화염 퍼짐 거동을 관찰한 경우를 나타내고 있다. 분위기 압력을 증가시키기에 따라 화염 퍼짐이 연속적인 모드로부터 간헐적 모드로 바뀌고, 연료의 초임계 압력(supercritical pressure)에서 화염 퍼짐이 존재하는 경우에서도 간헐적 모드는 유지된다. 분위기 압력이 증가할수록 화염 퍼짐의 간헐적 모드는 심화된다. 이것은 분위기 압력의 증가에 따른 화염 직경의 감소로 열경계층의 전달 시간이 증가하기 때문이다. 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 8에 나타내었다. 화염 좌측 밑에 관찰되는 작은 화염 상은 반대편 창으로부터 반사된 상이다. Figure 8에서 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 확인된다. 이러한 현상은 연료의 초임계 압력으로 분위기 압력이 증가하면 증발 잠열의 급격한 감소로 연료 증발율이 증가하기 때문이다[1,10].

Figure 9는 통상 중력하에서 분위기 압력에 따른 화염 퍼짐율의 변화를 나타낸다. 분위기 압력의 증가에 따라 화염 퍼짐율은 단조 감소하고, 화염 퍼짐의 한계 분위기 압력이 존재한다. 또한, 액적 간격이 증가함에 따라 액적 간격에 대한 화염 직경의 비가 감소하여 한계 분위기 압력은 감소하게 된다. 그러나, $D=1.0\text{mm}$, $s=1.5\text{mm}$ 와 $D=0.75\text{mm}$, $s=1.0\text{mm}$ 인 경우에 있어서는 화염 퍼짐이 연료의 초임계 압력까지 확장된다. 현재의 실험에서 3.0MPa 까지만 표시한 것은 그 이상의 분위기 압력에서

는 기연 액적들이 표면 장력의 감소로 고압 연소실 바닥으로 낙하하는 현상이 나타나 정확한 측정이 불가능하여 측정은 3.0MPa까지로 제한하였기 때문이다. 한편, 전술된 바와 같이 화염 퍼짐이 연료의 초임계 압력까지 확장되는 것은 Figure 8에서 보여진 바와 같이 초임계 압력들에서는 증발 잠열의 감소로 연료 증발이 급격히 촉진된다. 따라서, 화염 퍼짐이 연료의 초임계 압력까지 확장되는 것은 증진된 연료 증발과 관련이 있다. 이러한 효과를 상세히 조사하기 위해 미소 중력에서 실험을 수행하였다.

Figure 10은 미소 중력 및 통상 중력하에서 1.5mm, 3.0mm의 액적 간격에 대해 분위기 압력에 따른 화염 퍼짐율의 변화를 나타낸다. 현재의 미소 중력 실험 범위에서는 한계 분위기 압력은 나타나지 않는다. 미소 중력에 있어서는 화염 퍼짐율은 분위기 압력의 증가에 따라 최초로 감소하여 최소를 보이고, 다시 증가하여 최대를 보인 후 감소한다. 이에 대한 가능한 설명은 다음과 같다. 화염 퍼짐 시간은 다음과 같다.

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

여기서, t_i 는 미연 액적 주위의 가연 혼합기의 점화 시간, t_f 는 가연 혼합기의 일부가 점화한 후 화염이 가연 혼합기층을 전파하는 화염 전파 시간을 나타낸다. 점화 시간은 다시 기연 액적으로부터 형성된 열경계층이 미연 액적까지 전파하는데 걸리는 시간(t_{th})과 미연 액적 주위의 가연 혼합기층의 일부가 점화하기까지의 물리적·화학적 점화 지연 시간(t_d)으로 나눌 수 있다. 분위기 압력이 낮아 화염 퍼짐이 연속적 모드를 나타내는 경우에 있어서는 식(1)의 각 항에 의해 분리적으로 묘사하기는 어렵다. 그러나, t_f 는 연속적 모드와 간헐적 모드의 경우를 비교하면 급격한 변화를 나타내지는 않을 것으로 판단된다. 즉, 간헐적 모드에서는 t_f 는 화염 퍼짐 시간(t_s)에 비해 무시할 만하고 간헐적 모드로부터 연속적 모드로 변화하는 원인도 t_i 의 감소에 기인한다. 따라서, t_f 는 거의 일정하다고 가정해도 무방하며 분위기 압력의 증가에 따른 화염 거동은 주로 t_i 에 의존하게 된다. 한편, t_{th} 는 최소 점화 에너지가 가열되어야 할 가스의 부피에 비례한다는 개념[12]을 이용하여 다음과 같이 유도됨을 보일 수 있다.

$$t_{th} \sim s^2 \left(\frac{s}{d^*} - \frac{3}{2} + \frac{3}{4} \frac{d^*}{s} - \frac{1}{4} \frac{d^{*2}}{s^2} \right) \quad (3)$$

여기서, s 는 액적 간격이고, d^* 는 화염 직경을 나타낸다. 또한, 임계 압력 이하에서 단일 액적 점화에 관한 system Damköhler No.는 $\Delta \sim P^2$ 로 표시되고 이것은 분위기 압력의 증가에 의해 물리적·화학적 점화 지연 시간이 감소함을 의미한다[2,3]. 한편, 연료 증발율은 분위기 압력의 증가에 의해 증가하고[1,10], 점화 시간은 주로 증발율에 의존한다[2,3]. 결론적으로, 화염 퍼짐 시간은 분위기 압력의 증가에 따른 열경계층의 증가된 전달 시간과 감소된 점화 지연 시간의 경쟁 효과에 의해

나타나게 된다.

미소 중력의 낮은 압력 범위에서는 Figure 11a에 보여진 바와 같이 연속적 화염 퍼짐을 나타내며, 증발 연료의 안개상들이 관찰되지 않는 점으로부터 점화 시간의 감소 효과는 작을 것이 예측된다. 모드는 최소 화염 퍼짐을 근처에서 간헐적 모드를 나타내나 여전히 증발 연료의 안개상은 관찰되지 않는다. 따라서, 이러한 압력 범위에서 분위기 압력의 증가는 주로 열경계층의 전달 시간의 증가에 의한 화염 퍼짐율의 감소를 나타내게 된다. 그러나, 임계 압력 근처에서는 증발된 연료의 안개상들이 급격히 증가하게 된다. 따라서, 이러한 압력 범위에서는 분위기 압력의 증가에 의해 화염 직경이 감소하지만 연료의 증발이 우세해져 화염 퍼짐율은 다시 증가하게 된다. 한편, 단일 액적의 증발에 관한 연구[1]에서 증발 상수는 분위기 압력의 증가에 의해 단조 감소하고 어떤 초임계 압력에서 최대를 나타내고 다시 감소하는 것이 보고된다. 따라서, 이러한 압력 범위에서는 점화 시간의 증가할 것이 예상된다. 더욱이, 분위기 압력의 증가에 따른 화염 직경의 감소에 관한 결과는 초임계 압력 범위에서도 유효함이 실험과 계산을 통해 확인된다[1,11]. 결과적으로, 초임계 압력 범위에서 화염 퍼짐율이 다시 감소하는 이유는 이러한 두가지 효과에 기인한다.

결론

현재의 연구로부터 다음과 같은 결론들이 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) 화염 퍼짐율은 액적 간격에 대한 화염의 상대적 위치에 의존한다. 즉, 화염 퍼짐이 발생하지 않는 한계 액적 간격이 존재한다. 액적 간격이 감소에 따라 미연 액적이 고온 가스에 노출되어 화염 퍼짐율은 증가한다. 화염 직경과 일치하는 액적 간격에서 최대 화염 퍼짐율이 발생하고, 그 이상으로 액적 간격이 감소하면 증발 잠열의 냉각 효과로 화염 퍼짐율은 감소한다. 미소 중력에서 최대 화염 퍼짐율의 액적 간격 및 한계 액적 간격이 통상 중력의 경우에 비해 더 크다. 이것은 미소 중력의 경우가 자연 대류가 없어서 화염 직경이 더 크고 고온 가스도 기연 액적 주위에 머물러 열전달이 증진되기 때문이다.
- 3) 미소 중력에서 분위기 압력에 따른 화염 퍼짐율은 최초로 감소하여 최소를 나타내고, 증가하여 최대를 나타낸 후 다시 감소한다. 낮은 압력에서 화염 퍼짐율의 감소는 분위기 압력의 증가에 따른 화염 직경의 감소의 효과가 우세하게 작용하기 때문이다. 화염 퍼짐율이 연료의 초임계 압력의 어떤 분위기 압력에서 최대를 나타내는 것은 분위기 압력의 증가에 따른 미연 액적 연료로부터의 증진된 연료 증발율에 기인한다. 분위기 압력이 그 이상 증가하면 연료 증발의 효과는 둔화되는 반면, 초임계 압력에서도 여전히 화염 직경이 감소하는 효과에 의해 다시 화염 퍼짐율은 감소하게 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, *Comb. Flame*, Vol.24, p.89.
3. M. Mawid and S.K. Aggarwal, 1989, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.65, p.137.
4. R. Nakanishi, H. Kobayashi, S. Kato, and T. Niioka, 1994, *Twenty-fifth Symp.(Int.) on Comb.*, The Combustion Institute, p.447.
5. T. Niioka, T.Mitani, and J. Sato, 1984, *Twentieth Symp.(Int.) on Comb.*, The Combustion Institute, p.1877.
6. R. Reichenbach, D. Squires, and S.S. Penner, 1962, *Eighth Symp.(Int.) on Comb.*, The Combustion Institute, p.1068.
7. T.A. Brzustowski, A. Sobiesiak, and S. Wojcicki, 1981, *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. Dominicis, J.F. Tulpinsky, and D.R. Olson, 1969, *Twelfth Symp.(Int.) on Comb.*, The Combustion Institute, p.9.
10. A.R. Hall and J. Diederichsen, 1953, *Fourth Symp.(Int.) on Comb.*, p.837.
11. J. Sato, M. Tsue, M. Niwa, and M. Kono, 1990, *Comb. Flame*, Vol. 82, p.142.
12. J.A. Manrique and B.L. Borman, 1969, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.12, p.1081.

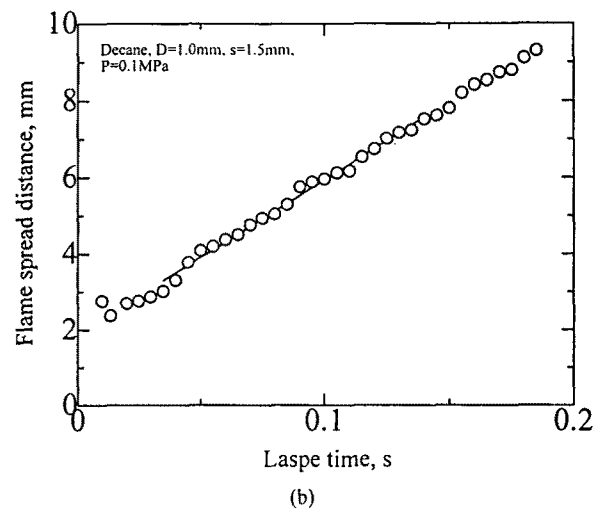
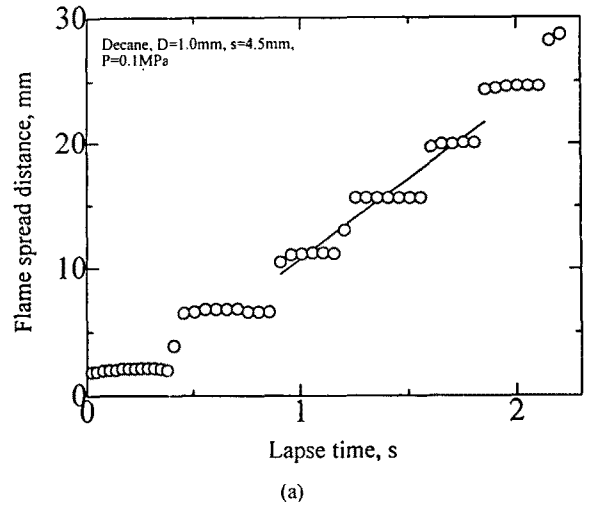


Figure 3 Variation of Flame Spread Distance with Time; P=0.1MPa, D=1.0mm, (a) s=4.5mm And (b) s=1.5mm

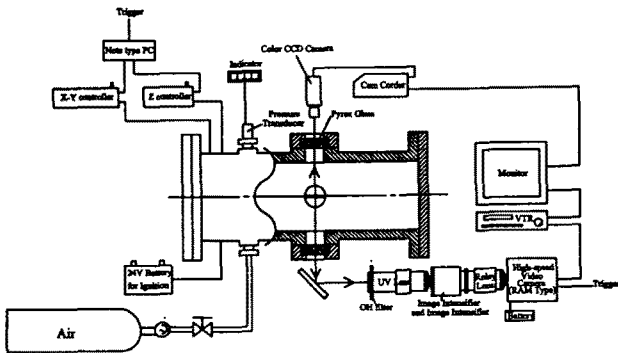


Figure 1 Schematic Drawing of Experimental Apparatus

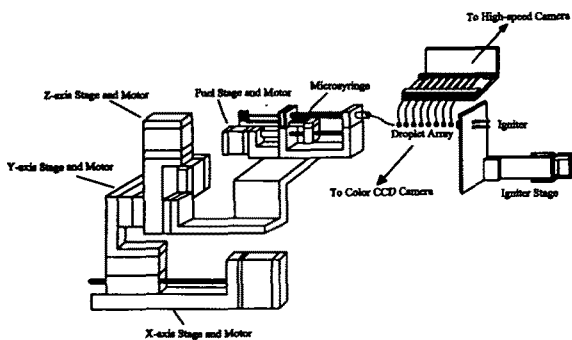
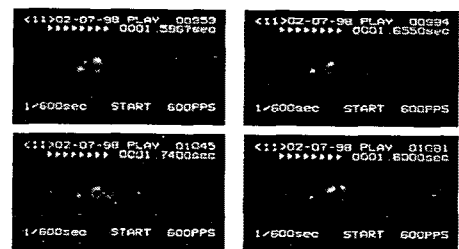
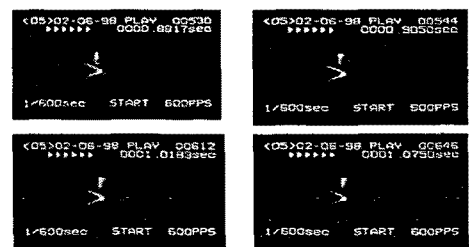


Figure 2 Schematic Representation of Droplet Array Generation System



(a)



(b)

Figure 4 Representative Chemiluminescence Images of OH Radical of Flame Spread with Droplet Spacing; P=0.1MPa, D=1.0mm, (a) s=4.5mm And (b) s=1.5mm

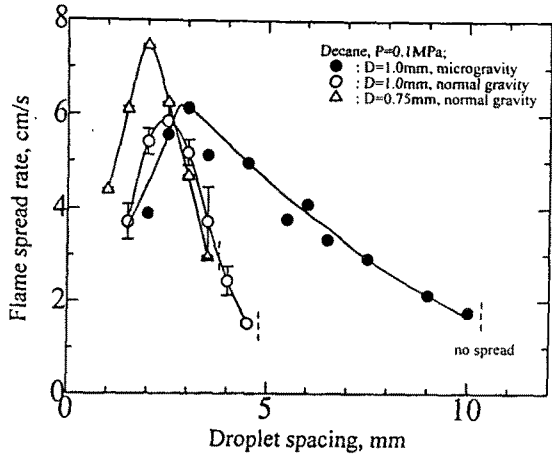


Figure 5 Variation of Flame Spread Rate with Droplet Spacing in Normal Gravity And Microgravity, P=0.1MPa

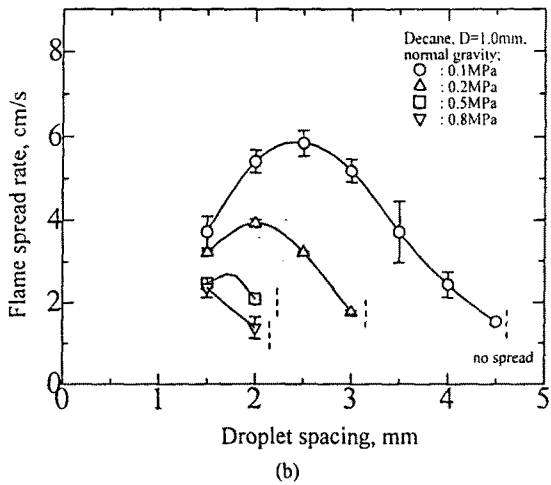
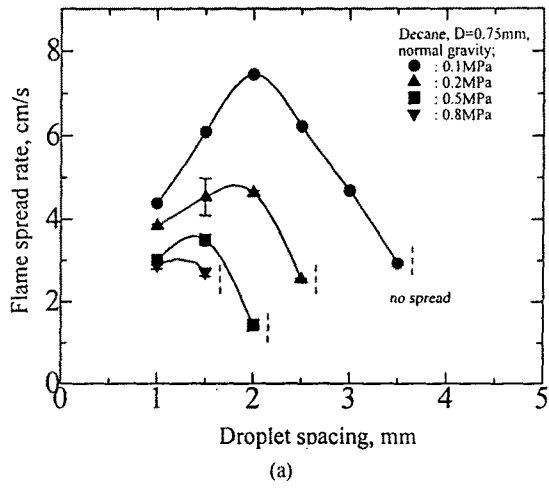
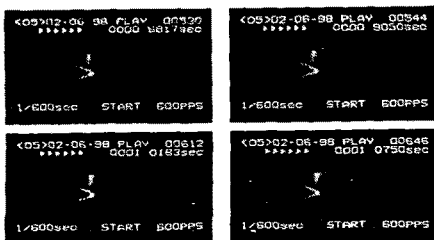
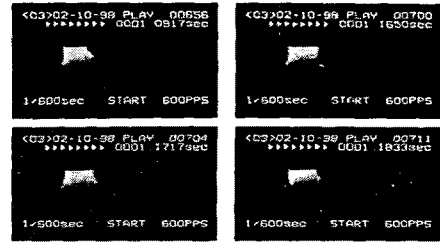


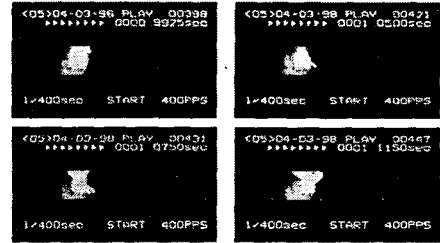
Figure 6 Variation of Flame Spread Rate with Droplet Spacing for Several Ambient Pressures in Normal Gravity; (a) D=0.75mm And (b) D=1.0mm



(a)



(b)



(c)

Figure 7 Typical Chemiluminescence Images of OH Radical of Flame Spread with Ambient Pressure; D=1.0mm, s=1.5mm, (a) P=0.1MPa, (b) P=0.8MPa, And (c) P=2.5MPa

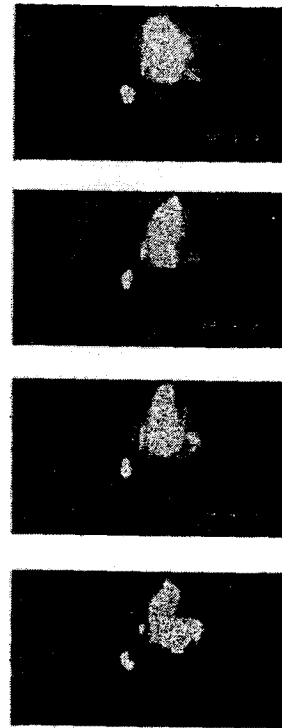
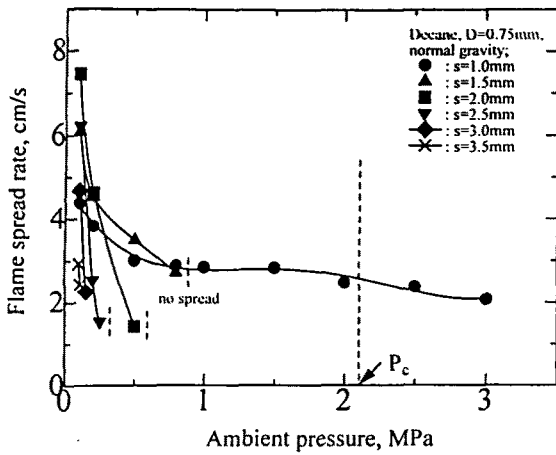
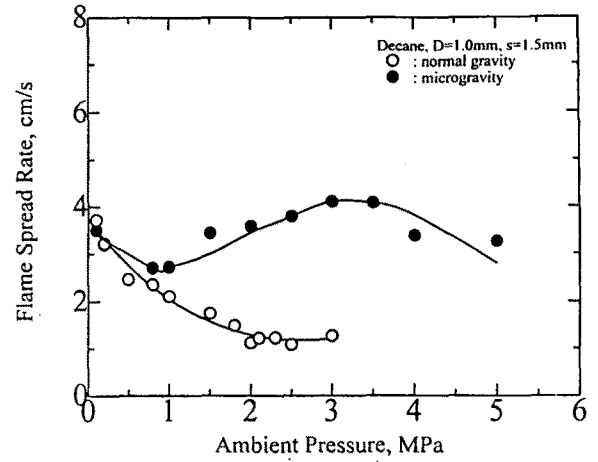


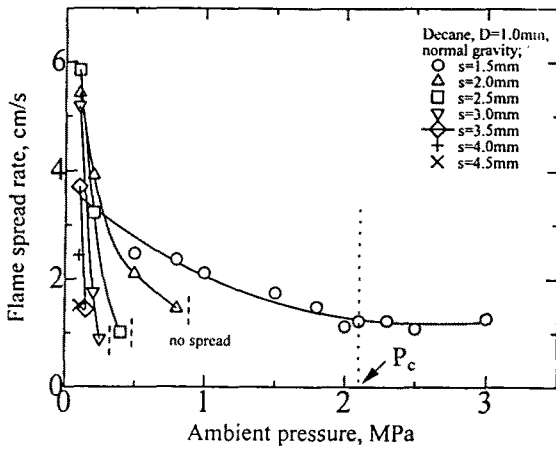
Figure 8 Direct Images of Typical Flame Spread at A Supercritical Pressure of Fuel; D=1.0mm, s=1.5mm, P=2.5MPa



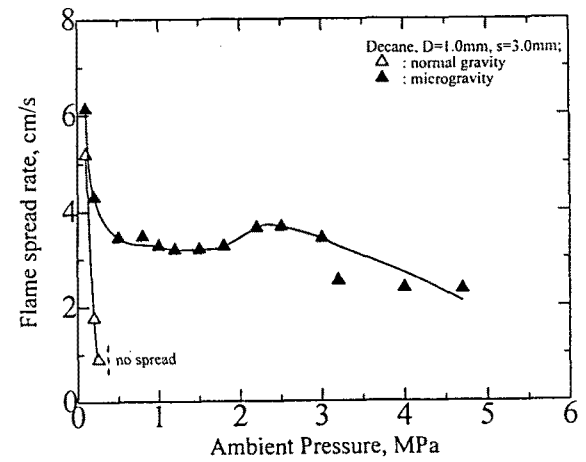
(a)



(a)



(b)



(b)

Figure 9 Variation of Flame Spread Rate with Ambient Pressure at Fixed Droplet Spacing: (a) $D=0.75\text{mm}$ And $D=1.0\text{mm}$

Figure 10 Variation of Flame Spread Rate with Ambient Pressure in Normal Gravity And Microgravity; $D=1.0\text{mm}$, (a) $s=1.5\text{mm}$ And (b) $s=3.0\text{mm}$

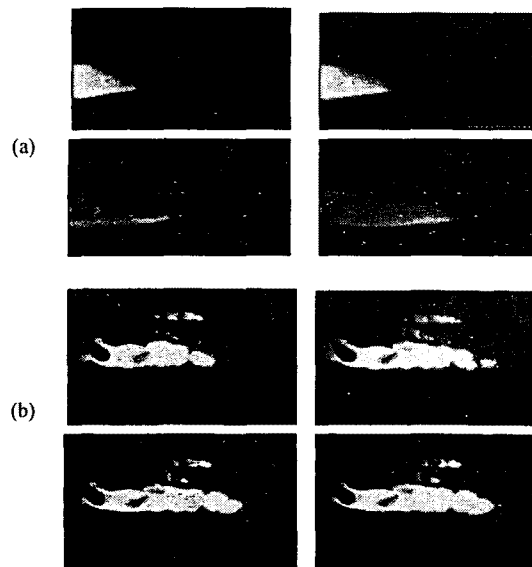


Figure 11 Typical Direct Images of Flame Spread in Microgravity; $D=1.0\text{mm}$, $s=3.0\text{mm}$, (a) $P=0.2\text{MPa}$ And (b) $P=3.0\text{MPa}$