

# 강제 대류하에서 일차원 액적 배열내의 화염 퍼짐에 관한 실험적 연구

박 정\* · 이기만\*\* · 新岡嵩\*\*\*  
(1999년 6월 21일 접수)

## An Experimental Study on Flame Spread in One-Dimensional Droplet Array with Forced Convection

Jeong Park, Kiman Lee and Takashi Niioka

Key Words: Flame Spread Rate(화염 퍼짐률), Ambient Air Velocity(주위 공기 속도), Droplet Spacing(액적 간격), Continuous Mode(연속적 모드), Intermittent Mode(간헐적 모드)

### Abstract

Experimental investigation on flame spread along suspended droplet arrays have been conducted with various droplet spacings and ambient air velocities. Especially, an opposed air stream is introduced to simulate fundamental flame spread behaviors in spray combustion. High-speed chemiluminescence imaging technique of OH radicals has been adopted to measure flame spread rates and to observe various flame spread behaviors. The fuel used is n-Decane and the air velocity varies from 0 to 17cm/s. The pattern of flame spread is grouped into two: a continuous mode and an intermittent one. It is found that there exists droplet spacings, above which flame spread does not occur. The increase of ambient air velocity causes the limit droplet spacing of flame spread to become small due to the increase of apparent flame stretch. As the ambient air velocity decreases, flame spread rate increases and then decreases after taking a maximum flame spread rate. This suggests that there exists a moderate air flowing to give a maximum flame spread rate due to enhanced chemical reaction by the increase of oxidizer concentration.

### 1. 서 론

분무(spray)의 초기 연소는 주위류에 대해 상대 속도를 갖는 상이한 크기의 액적의 상호 작용 하에서 증발, 확산 및 화학 반응 등 복합적 특성에 의해 나타나므로 실험적·이론적 접근을 통한 이해의 범주는 상당히 제한되어 왔다. 따라서, 초기 연소 특성을 파악하기 위한 기초적 모사(simulation) 연구의 대부분은 고온, 고압 및 주위

류가 존재하는 분위기 등 다양한 조건하에서 단일 액적(single droplet) 연료의 증발과 점화에 관한 연구에 집중되어 왔다.<sup>(1-5)</sup> 한편, PMMA (Polymethy methacrylate) 입자 군내에서의 화염 퍼짐에 관한 연구<sup>(6)</sup>로부터 얻어진 결과들이 일차원 액적 배열 하에서의 화염 퍼짐 거동과 유사성을 나타낸다는 것이 확인된 바 있다. 이러한 관점에서 실험 조건을 용이하게 변화시킬 수 있는 일차원 액적 배열(one-dimensional droplet array)에 관한 확장된 연구들은 분무 연소의 초기 화염 퍼짐(flame spread)을 이해하기 위한 중요한 수단임에도 불구하고 단일 액적에 관한 연구들에 비해 소수의 연구들만이 보고되어 왔다.

액적 크기에 비해 상대적으로 큰 액적 간격(droplet spacing)의 경우들에 있어서 화염 퍼짐 시간과 쉬리렌 상에 의해 정의된 침입 깊이

\* 회원, 항공우주연구소 우주추진기연구소  
E-mail : jeongpark@kari.re.kr  
TEL : (042)860-2936 FAX : (042)860-2602

\*\* 회원, 전남도립 담양대학 기계공학과

\*\*\* 東北大學 流體科學研究所

(immersion depth)의 상관 관계가 보고되었으나 쉬리렌 상에 근거한 침입 깊이에 대한 측정은 정의가 모호한 면이 있다.<sup>(7)</sup> 미연 액적의 점화 지연 시간은 화염 전파 시간에 비해 훨씬 길기 때문에 화염 퍼짐 시간은 액적 간격 사이에서의 불균일하다는 것이 인식되었다.<sup>(8)</sup> 연료의 아임계 압력(subcritical pressure) 하에서 분위기 압력을 증가시키면 화염 퍼짐률(flame spread rate)이 단조 감소한다는 것이 알려졌고,<sup>(9)</sup> 작은 액적 간격까지 확장된 연구에서는 액적 간격이 감소함에 따라 화염 퍼짐률은 증가하여 최대 화염 퍼짐률을 나타내는 액적 간격이 존재하고 액적 간격이 큰 경우에 있어서는 더 이상 화염 퍼짐이 유지될 수 없는 한계 액적 간격이 존재한다는 것이 보고된 바 있다.<sup>(10)</sup> 연료의 초임계 압력(supercritical pressure)까지 압력을 증가시키면 통상 중력(normal gravity)에서는 화염 퍼짐률이 단조 감소하는 반면 미소 중력(microgravity) 하에서는 화염 퍼짐률이 감소한 후 증가하여 연료의 임계 압력(critical pressure) 근처에서 최대를 나타낸 후 다시 감소한다는 것이 알려진 바 있다.<sup>(11-12)</sup> 결과적으로 화염 퍼짐률은 분위기 압력 증가에 따른 화염 직경의 감소 효과와 연료 증발을 증가 효과가 중첩되어 나타나게 됨을 알았다. 휘발성이 상이한 혼합 연료의 액적 배열에 관한 연구<sup>(13)</sup>에서는 액적 직경이 큰 경우에 있어서는 화염 퍼짐 시간이 휘발성이 높은 연료에 의존하며 작은 액적 직경의 액적에 대해서는 화염 퍼짐 시간이 휘발성이 낮은 연료에 의해 지배받는다는 것이 알려진 바 있다.

실제 분무에서 액적들은 주위류에 대해 상대 속도를 가지므로 주위류가 있는 일차원 액적 배열 하에서의 화염 퍼짐에 관한 연구는 분무 연소에서의 화염 거동에 있어서 주위류 속도에 따른 효과를 평가할 수 있는 중요한 수단이 될 수 있는 반면 현재까지 문헌에 보고된 예는 거의 없다. 현재의 연구에서 주위류가 있는 일차원 액적 배열 하에서 화염 퍼짐에 관한 연구가 수행된다. 사용된 연료는 n-Decane이고 액적 간격은 0-4.5mm까지 그리고 주위 공기 속도는 0-17cm/s 까지 변화된다. 화염 퍼짐률은 OH 라디칼의 화학 발광상(chemiluminescence image of OH radiac)으로부터 측정된다.

2. 실험 장치 및 방법

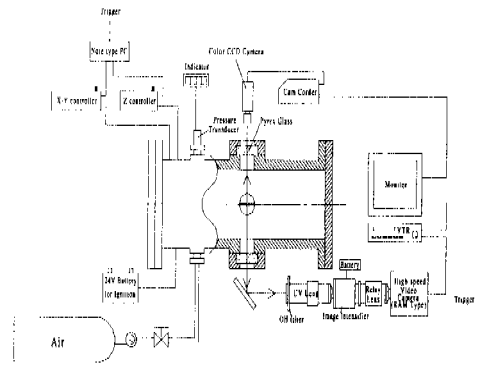


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

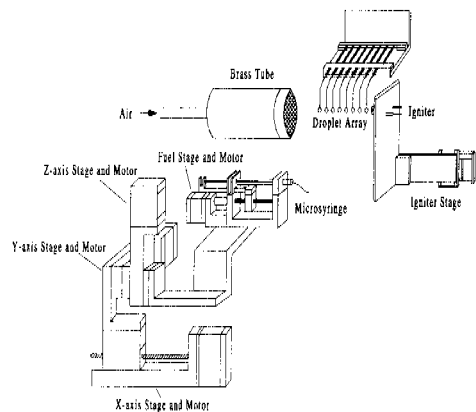


Fig. 2 Droplet array generation system

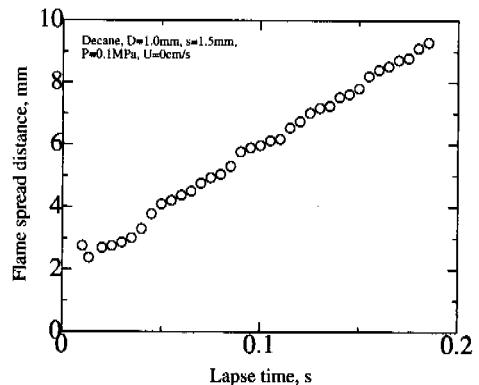


Fig. 3 Flame spread distance v.s. time

Fig. 1은 실험 장치도를 나타낸다.<sup>(10-13)</sup> 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, 반대편에 위치하는 창은 CCD 카메라에 의해 미소 주사기 액적을 서스펜더에 공급하는 과정을 관찰하기 위해 파이렉스 강화 유리로 구성하였다.

Fig. 2는 일차원 액적 배열을 생성하기 위한 장치를 나타낸다. 수평 일직선상에 액적 배열을 생성하기 위해 실리카 화이버(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  $135^\circ$ 를 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( $\text{n-C}_{10}\text{H}_{22}$ ,  $T_b=447.3\text{K}$ )이다. 서스펜더에 공급된 액적은 타원형이며 검정된 등가 직경은 다음과 같은 식으로 얻어진다.<sup>(5,7-13)</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 칸탈 선이고 0.7초간 24V, 8A가 공급되면 첫 번째 액적이 점화하여 미연 액적층으로 화염이 전달된다. 화염 퍼짐률은 Fig. 1에 보여진 바와 같이 화상 증폭기가 탑재된 고속 CCD 카메라에 의해 OH 라디칼 화학 발광 상으로부터 측정된다. 노출 시간은 1/250-1/1125s이고, 간섭필터의 중심 파장은 307nm, 반치폭은 11.4nm이다.

Fig. 2에 보여진 바와 같이 화염 퍼짐 방향의 반대 방향에서 직경 60mm, 두께 5mm, 다공성 (porosity)  $10 \mu\text{m}$ 의 소결 금속(sintered metal)으로부

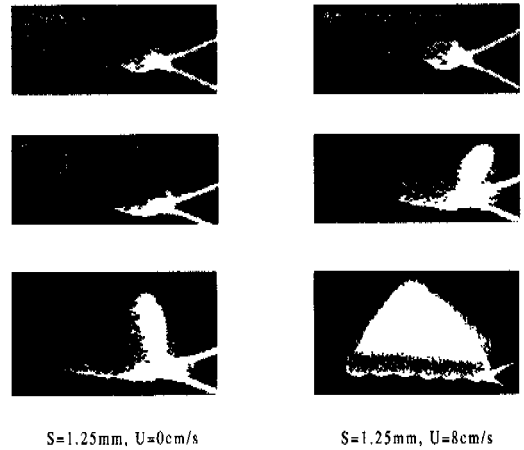


Fig. 4 Flame spread behavior with air Stream velocity;  $s=1.25\text{mm}$

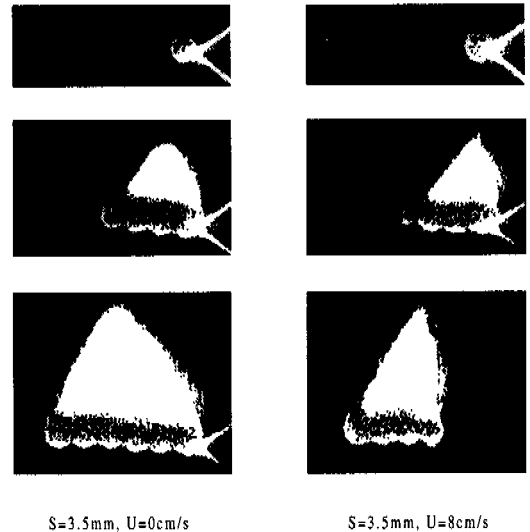


Fig. 5 Flame spread behavior with air stream velocity;  $s=3.5\text{mm}$

터 공기가 분사된다. 현재의 실험에서 첫 번째 액적과 통기공(vent) 사이의 거리는 50mm로 고정하였다. 따라서, 7번째 액적과 통기공 사이의 거리는 액적 간격의 증감에 따라 5mm에서 42.5mm까지 변화된다. 2MPa의 압력을 갖는 공기로 채워진 부피 1000cc의 고압 실린더로부터 고정도의 레귤레이터를 통해 검정된 공기가 공급된다. 주위 공기 속도가 17cm/s 이상이면 액적이 위치하는 서스펜더에 진동이 나타나게 되어 현재의 실

험은 0-17cm/s까지로 주위 공기 속도 범위를 제한하였다.

Fig. 3은 주위류 속도가 없는 경우의 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 기인한다. 화염 퍼짐률<sup>(10~13)</sup>은 시간에 따른 화염 퍼짐 거리의 일차식의 기울기에 의해 결정되고, 5회의 반복 실험으로부터 평균에 의해 결정된다. 사용된 서스펜더는 7개이고 화염 퍼짐률 측정을 위해 전체 6개의 액적 간격 구간 중 점화원의 영향을 고려하고 비대칭성의 문제가 있는 마지막 액적 간격을 제외하고 3에서 5의 액적 간격 구간을 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 논의

Figs. 4와 5는 액적 간격이 작은 경우와 큰 경우에 있어서 화염 퍼짐 방향에 반대 방향으로 주어지는 주위 공기 속도에 따른 화염 퍼짐 거리의 OH 라디칼 화학 발광의 고속 상을 나타낸다. 이때  $s$ 는 액적 간격을 나타낸다. 기존 연구<sup>(10~13)</sup>에서 관찰된 바와 유사하게 액적 간격이 큰 경우에 있어서는 화염 퍼짐은 간헐적 모드(intermittent mode)를 나타낸다. 즉, Fig. 5에 나타난 바와 같이 액적 간격이 큰 경우에 있어서 화염은 한정된 시간 동안 액적 간격내의 거의 고정된 위치에서 체류하면서 열전달에 의해 인접한 미연 액적(unburnt droplet)의 증발을 촉진시킨다. 미연 액적 주위의 점화 가능한 혼합기층(ignitable mixture layer)의 일부가 점화한 후 화염은 급히 가연 혼합기층을 전파하여 미연 액적 주위에 형성된다. 액적 간격이 더 증가하면 미연 액적 주위의 점화 가능한 혼합기의 점화 시간보다도 가연 액적의 연소 수명 시간(combustible life time)이 더 짧아 더 이상 화염이 미연 액적 주위로 전달되지 않는 한계 화염 퍼짐 액적 간격(limit droplet spacing of flame spread)이 존재하게 된다. 액적 간격이 감소하면서 액적 간격 사이에서 화염의 체류 시간이 점점 감소하여 화염 퍼짐은 연속적 모드(continuous mode)로 바뀌게 된다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 액적 간격이 작은 경우에 있어서 주위 공기 속도가 증가하게 되면 연속적 모드를 유지

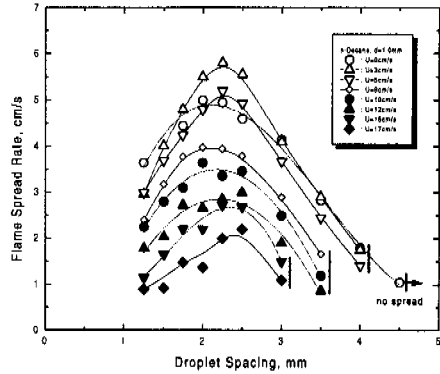


Fig. 6 Variation of flame spread rate with droplet spacing for several air stream velocities

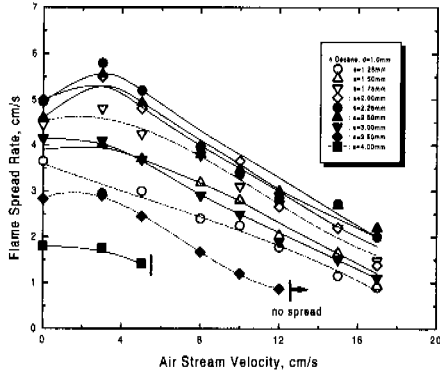


Fig. 7 Variation of flame spread rate with air stream velocity for several droplet spacings

하기는 하나 부력 효과로 나타나는 후류 화염(wake flame)은 화염 퍼짐 방향에 반대 방향으로 기울어져 있음을 알 수 있다. 한편, 단일 액적의 겉보기 화염 스트레치(apparent flame stretch)는  $U/d$ 로 표현된다. 여기서,  $U$ 는 주위 공기 속도,  $d$ 는 액적 직경이다. 즉, 주위 공기 속도의 증가에 따라 겉보기 화염 스트레치가 증가하면 가연 액적(burning droplet) 축의 화염 선단 온도는 감소하게 되고 결국 화염 소화에 이르는 한계 겉보기 화염 스트레치가 존재함이 보고된 바 있다.<sup>(14)</sup> 현재의 경우는 액적 배열의 경우이지만 겉보기 화염 스트레치는 여전히  $U/d$ 에 관련된다. 따라서, 이러한 화염의 기울어짐의 정도는 물리적으로 주위 공기 속도 증가에 따른 화염 선단부의 겉보기

화염 스트레치의 증가를 의미한다. 결과로서, 기연 액적 부로부터 미연 액적(unburnt droplet)으로의 열전달 감소에 따라 액적 주위 점화 가능한 혼합층의 점화를 지연시켜 화염 퍼짐 시간은 증가하게 된다. 액적 간격이 큰 경우에 있어서는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 주위 공기류가 없는 경우에는 5-6개의 전개 화염(developing flame)으로 미연 액적 주위 혼합층을 점화시키는 간헐적 화염 퍼짐 모드를 나타낸다. 그러나, 주위 공기 속도가 8cm/s가 되면 3-4개의 전개 화염으로 바뀌게 됨을 보이고 있다. 주위 공기 속도가 더 증가하면 1-2개의 전개 화염으로 화염 퍼짐을 유지하게 되어 결과적으로 화염 퍼짐의 한계 액적 간격이 감소하게 되는 과정을 보여주고 있다.

Fig. 6은 대기압 분위기에서 0-17cm/s까지 주위 공기 속도를 변화시키면서 n-Decane의 액적 직경이 1.0mm인 경우에 대해 액적 직경에 따른 화염 퍼짐률을 나타내었다. 주위 공기 속도가 17cm/s가 되면 미연 액적을 지지하고 있는 서스펜더에 진동(vibration)이 나타나게 되어 데이터의 오차가 커지게 되므로 현재의 속도 범위는 17cm/s로 제한하였다. 액적 간격이 큰 경우에 있어서는 어떤 액적 간격 이상에서는 기연 액적으로부터 열전달이 충분하지 않고 기연 액적의 수명 시간에 비해 미연 액적의 점화 시간이 길어 화염 퍼짐이 존재하지 않는 한계 액적 간격이 존재함을 알 수 있다. 또한, 주위 공기 속도를 증가시키면 전술한 바와 같이 걸보기 화염 스트레치가 증가하여 기연 액적 축의 화염 온도가 감소하게 되어 미연 액적으로서의 열전달을 감소시키므로 화염 퍼짐률의 한계 액적 간격은 감소하게 된다. 액적 간격이 감소함에 따라 미연 액적은 화염으로 접근하게 되어 고온 가스층에 노출되어 증발과 화학 반응이 촉진되므로 화염 퍼짐률은 증가하게 된다. 따라서, 기존의 연구<sup>(10-13)</sup>에서 언급한 바와 같이 최대 화염 퍼짐률은 미연 액적이 최대 온도에 노출되었을 때 나타나야 하므로 화염 반경과 일치하는 액적 간격에서 나타나야 한다. 또한, 주위 공기 속도가 증가하면 걸보기 화염 스트레치가 증가하여 대향류 화염에서와 같이 화염 반경이 거의 변화가 없거나 오히려 약간 감소해야 하므로 최대 화염 퍼짐률의 액적 간격은 감소할 것이 예상되었다. 그러나, Fig. 6에 나타난 바와 같이 주위 공기 속도에 따라 2.0-2.25mm의 액적 간격

범위에서 최대 화염 퍼짐률을 나타내고 있다. 한편, 화염 퍼짐 방향에 대향으로 주위 공기류가 존재하는 종이의 화염 퍼짐률에 관한 기존 연구<sup>(15)</sup>에서 공기 속도가 낮은 경우에 있어서 오히려 화염 퍼짐률이 증가함이 보고된 바가 있다. 이것은 적절한 속도로 공기가 공급되면 산화제 농도의 증가로 화학 반응을 촉진시키기 때문이다. 이러한 효과는 Fig. 6에 나타나듯이 U=0인 경우에 비해 U=3cm/s와 5cm/s인 경우에 최대 화염 퍼짐률의 액적 간격 근처에서 화염 퍼짐률이 더 크게 나타나는 것으로부터 유추될 수 있다. 따라서, 최대 화염 퍼짐률이 2.0-2.5mm 사이에서 변하는 것은 주위 공기 속도 변화에 따라 걸보기 화염 스트레치 증가와 적절한 산화제의 공급에 의한 화학 반응 증진의 중첩 효과로 간주된다. 액적 간격을 최대 화염 퍼짐률의 액적 간격 이상으로 감소시키면 인접한 미연 액적이 기연 액적의 화염 위치 안으로 접근함을 의미한다. 액적 간격이 영(zero)으로 접근하는 것은 물리적으로 액적 풀(pool)을 의미하므로 이러한 경우에 있어서는 열 용량(heat capacity)이 증가하여 연료의 증발이 용이하지 않으며 증발 잠열에 의한 냉각 효과에 의해 화학 반응률이 감소하게 되므로 결과적으로 화염 퍼짐률은 감소하게 된다. 결과적으로 주위 공기류의 존재에 따라 전술된 두가지 효과에도 불구하고 화염 퍼짐률은 액적 간격 사이에서의 화염 위치에 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 액적 간격을 1.25-4.5mm까지 변화시키면서 주위 공기 속도에 따른 화염 퍼짐률의 변화를 나타낸다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 어떤 액적 간격에서 공기 속도를 변화시키면 어떤 공기 속도 이상에서는 화염 퍼짐이 더 이상 존재하지 않는 한계 공기 속도가 존재한다. 액적 간격이 4.0mm와 3.5mm인 경우에는 각각 5cm/s와 12cm/s이다. 그러나, 나머지 경우에 대해서는 현재의 실험이 속도를 17cm/s 이상으로 증가시키면 서스펜더가 진동을 하게 되어 그 이상으로 속도를 증가시키지 못했기 때문에 한계 공기 속도를 찾지 못했으나 연속적 화염 퍼짐 모드를 갖는 경우에도 주위 공기 속도를 증가시키면 간헐적 화염 퍼짐 모드로 변하고, 극단적인 간헐적 화염 퍼짐 모드는 화염 퍼짐의 한계를 의미하므로 모든 경우에 대해 화염 퍼짐의 한계 공기 속도가 존재하는 것

으로 판단된다. n-Octane을 연료로 주위 공기 속도가 상대적으로 크고( $U=0, 5, 10\text{in/s}$ ) 액적 간격이 큰 경우를 실험한 기존 연구 결과<sup>(16)</sup>에서는 주위 공기 속도가 증가함에 따라 화염 퍼짐률이 난조 감소하는 경향만이 보고되었다. 그러나, 진술된 바와 같이 주위 공기 속도가 없는 경우에 비해 주위 공기 속도가 없는 경우에 주위 공기 속도가  $3\text{cm/s}$ 까지는 화염 퍼짐률이 증가하는 것은 적절한 산화제의 공급이 화학 반응을 촉진시키기 때문이다. 그러나, 그 이상으로 주위 공기 속도가 증가하게 되면 겉보기 화염 스트레치에 의한 기연 액적측 화염 온도가 감소하는 효과가 더욱 커지게 되어 화염 퍼짐률은 감소하게 된다. 결과적으로, 주위 공기류(ambient air stream)가 존재하는 액적 배열 하에서 화염 퍼짐에 있어서는 화염 퍼짐률을 최대가 되게 하는 적절한 주위 공기류의 속도가 존재한다는 사실을 알 수 있다.

한편, 화염 퍼짐 방향에 대향으로 주위류가 존재하는 경우에 있어서 화염 퍼짐률은 국부적인 산화제 농도, 기연 액적의 화염 온도, 액적 간격에 따른 미연 액적과 기연 액적의 상호 작용 등 고려되어야 할 변수가 많기 때문에 실제 화염 퍼짐률과 공기 속도의 함수로 단순히 표시될 것 같지는 않다. 그러나, Fig. 7에 보여진 바와 같이  $U=3\text{cm/s}$  이상인 경우에 있어서 주위 공기 속도에 대한 화염 퍼짐률의 기울기는 평균적으로  $dV_f/dU \approx -0.23$ 의 관계가 존재한다는 것을 알 수 있다. 이러한 선형적 관계는  $V_f$ 가 최대가 되는 값으로부터 유효하므로 측정된 화염 퍼짐률은 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$V_f = (V_f)_{\max} - 0.23U \quad (2)$$

여기서,  $V_f$ 는 실험에서 측정된 화염 퍼짐률,  $(V_f)_{\max}$ 는 최대 화염 퍼짐률 그리고  $U$ 는 주위 공기 속도를 나타낸다. 결과적으로, 주위 공기 속도가  $U=3\text{cm/s}$  이상인 경우에 있어서는 화염 퍼짐률은 주위 공기 속도에 대해 식 (2)와 같은 선형적인 관계를 갖는다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

대향으로  $0-17\text{cm/s}$ 의 주위 공기류가 있는 일차원 액적 배열 하에서 화염 퍼짐에 관한 실험적 연구가 수행되었고 다음과 같은 결론이 얻어진

다.

(1) 화염 퍼짐 거동은 대표적으로 연속적 모드와 간헐적 모드로 나뉘어진다. 액적 간격이 작은 경우에 연속적 화염 퍼짐 모드를 나타내고 액적 간격이 증가하면서 간헐적 모드로 바뀌게 된다.

(2) 액적 간격을 변화시키며 얻어진 결과로부터 화염 퍼짐률은 액적 간격 사이에서의 화염의 위치에 의존한다는 것을 알 수 있다.

(3) 주위 공기 속도를 변화시키며 얻어진 결과로부터 화염 퍼짐률은 적절한 산화제의 공급이 화학 반응을 촉진시키는 효과와 겉보기 화염 스트레치에 의한 기연 액적 화염 선단부 온도를 감소시키는 효과가 중첩되어 나타나고 있음을 알 수 있다.

(4) 주위 공기 속도가  $U=3\text{cm/s}$  이상인 경우에 있어서는 화염 퍼짐률은 주위 공기 속도에 대해 약  $0.23$ 의 기울기를 가지고 선형적으로 감소한다는 것을 알 수 있다.

#### 참고문헌

- (1) Manrique, J.A. and Bormab, B.L., 1969, "Calculation of Steady State Droplet Vaporization at High Pressures," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 12, p. 1081
- (2) Law, C.K., 1975, "Asymptotic Theory for Ignition and Extinction in Droplet Burning," *Comb. Flame*, Vol. 24, p. 89.
- (3) Niioka, T., Mitani, T. and Sato, J., 1984, "Ignition Characteristic of a Two-Component Condensed Fuel in a Stagnant-Point Flow," *Twentieth Symp.(Int.) on Comb., The Combustion Institute*, p. 1877.
- (4) Tsukamoto, T. and Niioka, T., 1993, "Dynamics of Heterogeneous Combustion and Reacting Systems," *Progress in Aeronautics and Astronautics, AIAA*, Vol. 152, p. 263.
- (5) Nakanishi, R., Kobayashi, H., Kato, S. and Niioka, T., 1994, "Ignition Experiment of a Fuel Droplet in High-Pressure High Temperature Ambient," *Twenty-Fifth Symp.(Int.) on Comb., The Combustion Institute*, p. 447.
- (6) Kobayashi, H., Ono, N., Okuyama, Y. and Niioka, T., 1994, "Flame Propagation Experiment

- of PMMA Particle Cloud in a Microgravity Environment," *Twenty-Fifth Symp.(Int.) on Comb., The Combustion Institute*, p. 1685.
- (7) Reichenbach, R., Squires, D. and Penner, S.S., 1962, "Flame Propagation in Liquid-Fuel Droplet Arrays," *Eight Symp.(Int.) on Comb., The Combustion Institute*, p. 1068.
- (8) Brzustowski, T.A., Sobiesiak, A. and Wojcicki, S., 1981, "Flame Propagation Along An Array of Liquid Fuel Droplets at Zero Gravity," *Eighteenth Symp.(Int.) on Comb., The Combustion Institute*, p. 265.
- (9) Okajima, S., Kimoto, T., Abe, K. and Yamaguchi, S., 1989, *JSME Trans.(B)*, Vol. 47, No. 422, p. 2058.
- (10) 박 정, 신현동, 小林秀昭, 新岡嵩, 1999, "일차원 액적 배열하에서 화염 퍼짐에 관한 실험적 연구," *대한기계학회논문집 B편*, 제23권, 제1호, p. 131.
- (11) 박 정, 신현동, 小林秀昭, 新岡嵩, 1999, "통상 및 미소 중력의 초임계 압력하에서 일차원 액적 배열의 화염 퍼짐 거동의 비교 연구," *대한기계학회논문집 B편*, 제23권, 제1호, p. 140.
- (12) Park, J., Kobayashi, H. and Niioka, T., 1999, "A Study of Flame Spread Along a Droplet Array at Elevated Pressures up to a Supercritical Pressure," *Int. J. Energy Research*, Vol. 23, p. 813.
- (13) Park, J., Kobayashi, H. and Niioka, T., 1999, "Flame Spread Behavior of Blended Fuel Droplet Array," *Int. J. Energy Research*, in press.
- (14) Spalding, D.B., 1952, "The Combustion of Liquid Fuels," *Fourth Symp.(Int.) on Comb., The Combustion Institute*, p. 847.
- (15) Olson, S.L., Ferkul, P.V. and T'ien, J.S., 1988, "Near-Limit Flame Spread over a Thin Solid in Microgravity," *Twenty-Second Symp.(Int.) on Comb., The Combustion Institute*, p. 1213.
- (16) Anonymous Contribution, 1962, "Flame Propagation in Liquid Fuel Droplet Arrays with Forced Convection," *Comb. Flame*, p. 127.