

유화액적 배열에서의 자발화와 미소폭발의 특성

정인철 · 이경환*[†] · 김재수**

순천대학교 대학원, *순천대학교 기계우주항공공학부, **조선대학교 항공우주공학과
(2007년 3월 7일 접수, 2007년 9월 28일 채택)

Characteristics of Auto-ignition and Micro-explosion for Array of Emulsion Droplets

Incheol Jeong, Kyung-Hwan Lee*[†] and Jaesoo Kim**

Graduate School, Suncheon National University, 315 Maegok-dong, Suncheon, Jeonnam 540-742, Korea

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon National University,
315 Maegok-dong, Suncheon, Jeonnam 540-742, Korea

**Department of Aerospace Engineering Chosun University,
375 Seosuk-dong, Dong-Gu, Gwangju 501-759, Korea

(Received 7 March 2007, Accepted 28 September 2007)

요 약

데칸에 물을 혼합하여 일정한 크기와 간격으로 유화액적배열을 형성하여 물과의 혼합비율, 액적의 수 그리고 액적 간격 등이 연소특성에 어떠한 영향을 주는가를 고온의 연소실에서 파악하였다. 각각 10%, 20%, 30%의 물을 혼합하여 유화액적을 만든 후 일정한 크기의 액적을 각각의 서스펜더에 매달아서 일정한 간격의 액적배열을 만들어 고온에서 자발화를 시켰을 때, 점화지연, 수명시간, 전연소시간 그리고 미소폭발 등의 연소특성을 비교하였다. 대기압에서 연소실의 온도를 920 K로 하고 서스펜더의 수를 3개와 5개로 하였으며 액적배열의 간격은 3~7 mm 범위에서 1 mm 간격으로 각각 실험을 수행하였다. 본 실험을 통하여 물의 혼합비율이 높을수록, 그리고 액적배열의 간격이 넓을수록 점화지연현상이 길게 나타났으며, 수명시간은 액적의 간격이 넓을수록 짧게 나타났으며 점화지연시간과 수명시간의 합인 전연소시간은 액적의 수량이 3개인 경우가 점화지연시간이 긴 관계로 5개에 비해 길게 나타남을 확인하였다.

주요어 : 액적배열, 미소폭발, 이멀션유, 점화지연, 연소 억제제

Abstract — The auto-ignition characteristics and combustion behaviors of one-dimensional array of water-in-fuel droplets suspended in a high temperature chamber have been investigated experimentally with various droplet spacing and number of droplets. The fuels used were pure n-decane and emulsified n-decane with water contents varied from 10% to 30%. All experiments have been performed at 920 K under the atmospheric pressure. The number of droplets in an array were fixed as 3 or 5 and its spacing was varied from 3 mm to 7 mm by 1 mm interval. The imaging technique with a high-speed camera has been adopted to measure the ignition delay and flame life time. The micro-explosion behaviors were also observed. As the droplet array spacing increased, the ignition delay also increased regardless of water contents. However, the life

[†]To whom correspondence should be addressed.

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon
National University, 315 Maegok-dong, Suncheon, Jeonnam
540-742, Korea
Tel: 061-750-3822
E-mail: khlee@sunchon.ac.kr

time of droplet array decreased as the droplet spacing increased. The full combustion time in array of 3 droplets was found to be longer than that for 5 droplets case due to the longer ignition delay.

Key words : Droplet array, Micro-explosion, Water-in-fuel emulsion, Ignition delay, Combustion inhibitor, Combustion enhancer

1. 서 론

점차 고갈되어가고 있는 석유 에너지 자원의 효율적인 활용과 지구온난화에 대해 효과적으로 대비하기 위해 연비향상에 대한 연구·개발이 활발하게 이루어지고 있다. 또한, 유해한 배출가스의 증대로 대기오염에 대한 경각심이 커지고 규제가 강화되면서 유해한 배출가스의 억제에 대해 많은 방법들이 시도되고 있다. 이러한 상황에서 이제까지 큰 역할을 하지 못하였던 비교적 휘발성이 낮은 고비등점 액체연료의 활용에 대해서도 관심이 커지고 있으며 이러한 연료의 효율적인 사용방법에 대해서도 많은 연구·개발이 필요하다. 그런데, 이러한 저휘발성 액체연료가 가지고 있는 문제점은 분무를 할 때 기화가 잘 안되어 착화가 어렵고 연소 시 여러 가지 유해한 배출물질이 많다는 것이다. 이러한 문제점의 해결을 위해서는 액체연료의 기화성을 개선하여 연소특성을 향상시킬 필요가 있는데, 이는 연료의 미립화(atomization)를 증대시켜 증발과정을 촉진시킴으로써 해결이 가능할 것이다. 액체연료의 연소특성을 향상시키는 방법의 하나로 액체연료에 소량의 물을 첨가하는 방법이 시도되고 있다. 실제의 연소기에서 연료에 물을 첨가시킨 유화연료를 연소시킨 결과 미소폭발(micro-explosion)현상이 발생하게 되어 연료의 미립화가 촉진되면서 연소가 활발하게 이루어지는 것을 알 수 있으며, 이로 인해 연소효율을 저하시키지 않으면서 매연물질(Soot), 질소산화물(NOx), 황화합물(SOx), 일산화탄소(CO) 등의 공해물질의 배출이 억제 되었다는 연구결과들이 보고되고 있다^{[1][2]}. 분무 연소기에서의 초기 연소 특성은 유체 역학적, 열역학적, 및 화학 반응 과정뿐만이 아니라 액적간의 상호작용 등 복잡한 현상에 의해 실제적 이해가 제한되어 왔다. 단일 액적에 대한 점화 특성의 연구^{[3][4]}가 분무 연소기의 점화특성을 이해하는데 많은 기여를 해왔지만, 연소기내의 초기 연소 특성에 대한 이해의 증진을 위해서는 화염 퍼짐 거동에 대한 많은 이론적·실험적 접근들이 요구된다.

일차원 액적 배열에서의 화염 퍼짐^{[5][6][7]}에서 실제 분무기를 통한 직접적 접근은 액적의 직경, 액적 간격, 주위류의 속도, 분위기 압력과 온도 등 다양한 인자에 의해 영향을 받기 때문에 복잡한 양상을 띤다. 일차원 액적 배열은 화염 퍼짐(flame spread) 거동을 체계적으로 이해할 수 있는 유용한 수단을 제공함에도 불구하고 소수의 연구들만이 보고되고 있으며^[8], 미연 액적의 점화

시간이 최소가 되기 위해서는 액적직경이 줄어들거나 공기유동속도가 증가해야 하는^[9] 등의 조건 등이 주어져야 한다.

본 연구는 데칸(n-Decane)에 소량의 물을 혼합하여 유화 액적을 만들어서 유화 액적 배열(emulsion droplet array)의 연소상태의 특성을 연구하는데 그 목적이 있다. 액적이 고온에 노출되어 점화되기 전까지 지연되는 시간인 점화지연시간(ignition delay), 액적이 점화 후 연소 진행과정을 거쳐 소화되기까지의 시간인 수명시간(life time), 점화지연시간과 수명시간의 합인 전연소기간(full combustion time) 그리고 액적의 미소폭발현상이 물의 혼합비율에 따라서 나타나는 변화와 특성을 연구하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구를 위한 전체적인 실험 장치는 Fig. 1에 나타나고 있다. 실험 장치를 크게 분류하면 액적을 일정한 온도에서 연소하기 위한 전기로(연소실), 만들어진 액적을 점화하기에 알맞은 위치로 이동하기 위해 스텝 모터의 구동에 의해 구동되는 자동 이송장치, 전기로를 일정한 높이로 상하 왕복시키는 유압구동장치, 그리고 전기로의 상하 이동거리를 제어하는 상하 리미트 장치와 전기로의 하부를 열고 닫아주는 슈트 개폐 장치 등이 있으며 고속 비디오 카메라와 P/C로 구성되어 있다. 연소실 내부의 크기는 가로와 세로가 250 mm, 길이 300 mm, 두께는 20 mm이다. 연소실에는 200 mm 직경의 1개의 관찰창을 갖는데 액적의 점화 상태를 관찰하여 고속으로 사진 촬영하기 위한 석영 유리창이 부착되어 있다.

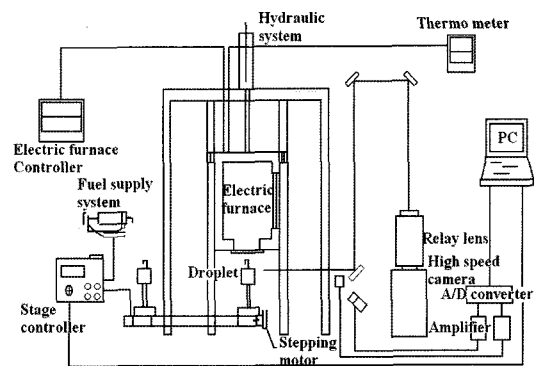


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Properties of tested fuel.

Fuel	n-Decane
Symbol for element	CH ₃ (CH ₂) ₈ CH ₃ =142.28
Manufacture	Junsei Chemical co
Assay (GC)	min 95.0%
Lot No.	2C2101
Melting point (°C)	-30°C
Boiling point (°C)	174°C
Density	0.73 cm ³ /g

수평 일직선상에 액적을 생성하기 위해 실리카 파이버 (silica fiber)로 제작된 서스펜더(suspender)가 외경 1.25 mm의 세라믹 관에 고정되어있다. 서스펜더의 직경은 150 ± 10 μm이고 용이한 액적 부착을 위해 끝부분은 300 ± 10 μm 구형으로 가공된다. 연료 공급계는 50 μl의 내부 용적을 갖는 미소 주사기(microliter syringe)와 스텝 모터로 작동되는 4축 자동 이송기로 구성된다. 각 서스펜더의 위치를 먼저 감지하고 PC로부터의 명령에 의해 연료가 각 서스펜더에 공급된다. 4축 자동 이송기의 작동 시작으로부터 1개의 서스펜더에 액적 연료를 공급하게 된다.

사용된 연료는 데칸(n-C₁₀H₂₂, 비등점=447.3 K)과 물(H₂O)로 특성은 Table 1에 나타나 있다. 서스펜더에 공급된 액적은 타원형이며 검정된 등가 직경은 다음과 같은 식으로 얻어진다^{[3][5]}.

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

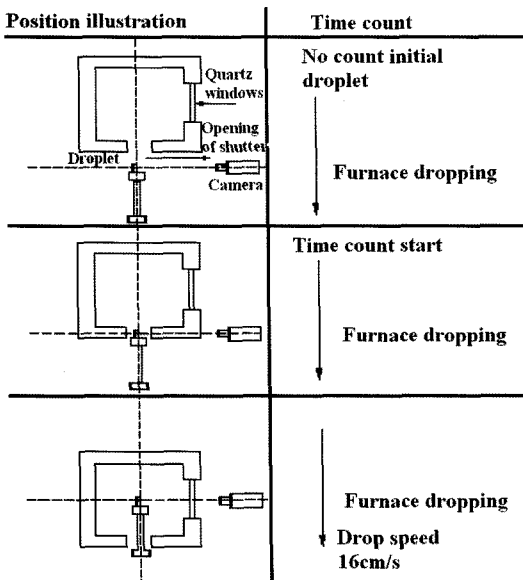


Fig. 2. Illustration of time count.

여기서 D₁, D₂는 각각 액적의 단경과 장경을 나타내고 있다. Fig. 2는 전기로가 액적의 중앙으로 이동할 때 점화시간을 측정하는 장면을 표시한 것이다. 전기로를 상하왕복 운동시키는 유압실린더가 작동하여 전기로 아래의 액적이 고온에 노출되는 시점부터 카메라 셔터가 작동되면서 점화지연시간이 시작되는데 액적의 중심과 전기로 하부의 슈트 위 전기로 벽돌층의 상부와 일치할 경우 센서에 의해 자동으로 작동하도록 되어있다. 전기로의 낙하속도는 16 cm/s이며 카메라의 촬영속도는 250 fps이다. 그리고 모든 실험은 대기압 상태에서 실행되었다.

3. 실험결과 및 검토

3-1. 물의 함량에 따른 점화지연 특성

일반적으로 액적 연료의 크기와 휘발성은 점화시간에 중대한 영향을 주며, 단일 액적 연료의 점화시간은 증발시간과 화학반응시간으로 표현된다^[6]. 액적 연료가 크거나 휘발성이 작은 경우에 있어서는 액적 연료의 표면온도가 비등점(boiling temperature) 근처에 이르기까지

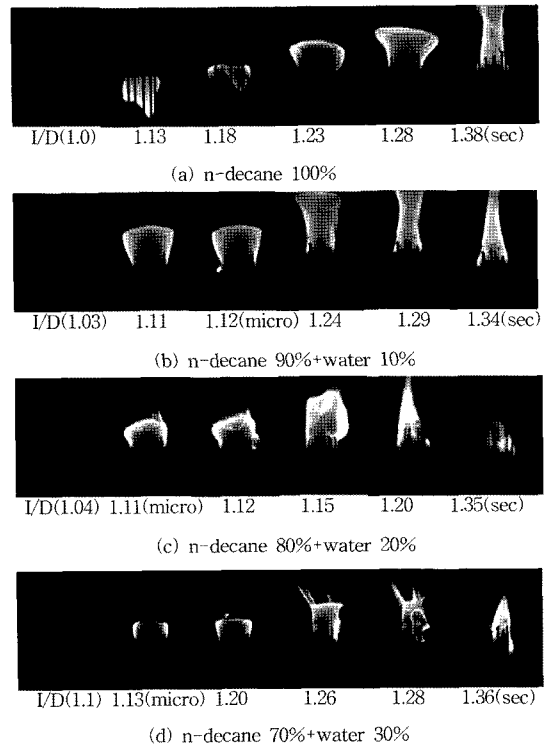


Fig. 3. Direct photographs of combustion behavior for emulsified n-Decane droplets array (T_a=920 K, D=1.0 mm, Droplet array spacing=3 mm, n=5).

증발이 거의 이루어지지 않다가 활발한 증발이 순간적으로 나타나기 때문에 혼합과 화학반응시간은 무시될 수 있다. 액적 직경이 작은 경우 연료 증기의 질량 유속이 급격히 증가하기 때문에 화학 반응시간이 길어지게 된다. 따라서 휘발성이 강한 연료의 과도한 증발은 오히려 점화지연시간을 지체할 수 있다. 점화는 wake 흐름지역에서 발생하고, 그 때에 반응지역은 위쪽으로 퍼지고 마지막으로 액적을 둘러싼 화염을 형성하게 된다.

Fig. 3은 분위기 온도(T_a) 920 K, 액적 크기 1.0 mm, 액적간격(Droplet array spacing) 3 mm, 액적 수(n) 5인 경우에 대해, 액적 배열이 점화지연시간을 지난 후 연소하는 장면을 촬영한 것으로, 그림 순서에 따라 순수한 데칸과 데칸에 물을 각각 10%, 20%, 30%를 혼합하여 연소 시 미소폭발이 최초로 발생하는 장면을 나타내는 것이다. 물이 10% 때에는 아주 약하게 미소폭발이 발생하다가 물의 비율이 증가할수록 미소폭발이 점점 더 강하게 나타남을 볼 수 있다. 이 경우 미소폭발이 강하게 일어나면 액적의 일부는 비산하여 테스트 섹션을 벗어나 화염이 작게 나타나기도 한다.

Fig. 4는 주 연료인 데칸에 물을 각각 10%, 20%, 30%의 비율로 혼합하고 액적의 크기는 1.0 mm, 분위기 온도를 920 K에서 액적 배열의 수는 각각 3개이고 액적간의 간격을 3~7 mm인 경우에 점화지연시간이 어떻게 나타나는가를 보여주고 있다. 물의 함유비율이 높은 30%에서는 단일 액적에서와 마찬가지로 점화지연이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다^[6]. 그리고 액적간의 간격이 넓을수록 점화지연현상이 길게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 5는 주 연료인 데칸에 물을 각각 10%, 20%, 30%로 혼합하고 액적의 크기 1.0 mm, 분위기 온도 920 K에서 액적의 수가 각각 5개이고 액적간의 간격을 3~7 mm로 변경한 경우에 대해 점화지연이 어떻게 나타나는가

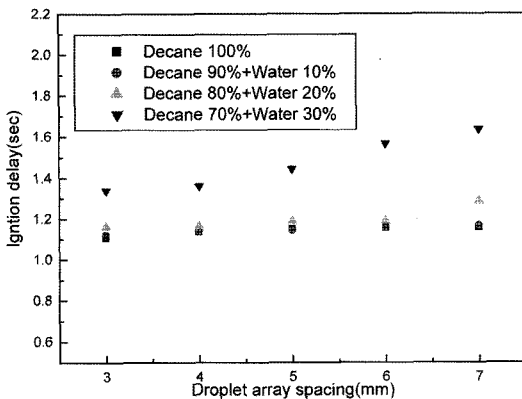


Fig. 4. Effect of droplet array spacing and water contents on ignition delay ($T_a=920$ K, $D=1.0$ mm, $n=3$).

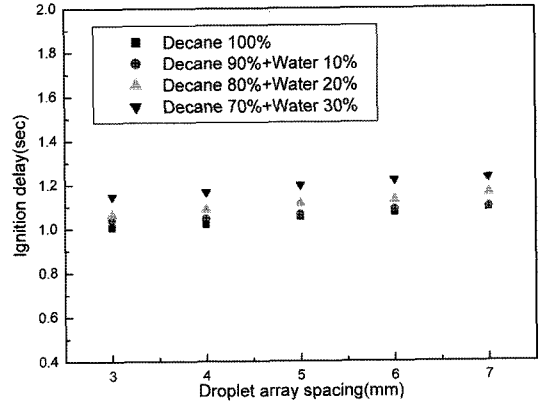


Fig. 5. Effect of droplet array spacing and water contents on ignition delay ($T_a=920$ K, $D=1.0$ mm, $n=5$).

를 보여주고 있다. 물의 비율이 높을수록 단일 액적에서와 마찬가지로 점화지연이 길어짐을 알 수 있다^[6]. 그리고 액적간의 간격이 넓을수록 점화지연현상이 점점 더 길어짐을 알 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5를 비교해보면 같은 분위기 온도에서도 액적의 수량이 많을수록 점화지연시간이 짧아지는 것을 관찰할 수 있다.

이것은 연료 증기의 흐름이 많은 곳에서 점화가 빨리 일어나고 있음을 의미한다고 할 수 있다.

3-2. 물의 함량에 따른 수명시간 특성

수명시간이란 액적이 고온에 노출되어 점화지연시간을 지나서 액적에 불꽃이 점화되어 연소되기 시작하여 연소가 종료되어 소화되기까지의 시간을 의미하고 있다.

Fig. 6은 데칸에 물을 각각 10%, 20%, 30% 혼합하

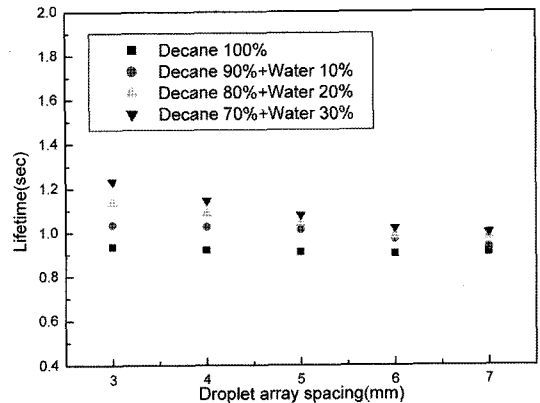


Fig. 6. Effect of droplet array spacing and water contents on lifetime ($T_a=920$ K, $D=1.0$ mm, $n=3$).

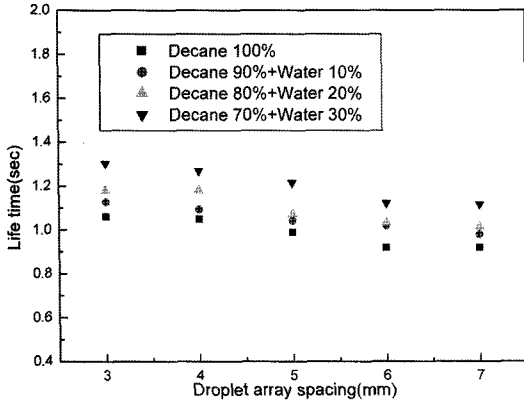


Fig. 7. Effect of droplet array spacing and water contents on lifetime ($T_a=920$ K, $D=1.0$ mm, $n=5$).

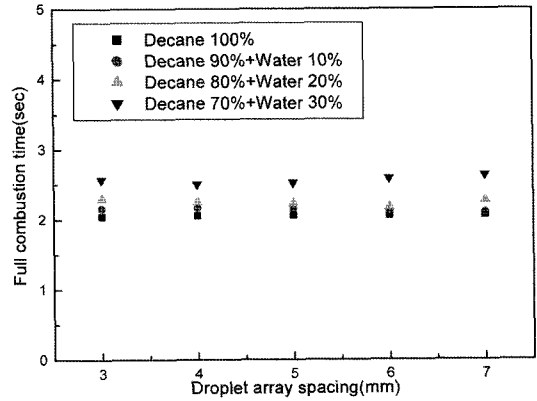


Fig. 8. Effect of droplet array spacing and water contents on full combustion time ($T_a=920$ K, $D=1.0$ mm, $n=3$).

고, 액적의 수가 3개인 상태에서 연소시켰을 때 수명시간의 변화를 나타내고 있다. 순수 데칸을 연소시켰을 때는 수명시간이 액적간의 거리에 따라 크게 변화가 없으나 물의 혼합비율이 높을수록 수명시간은 현저하게 감소함을 알 수 있다. Fig. 7은 액적이 5개인 경우 물의 혼합비율에 따라 수명시간이 어떻게 변화하는가를 보여주고 있다. 물의 혼합비율에 따라 점점 수명시간이 줄어들다가 액적간격이 6 mm, 7 mm에서는 거의 변화의 폭이 없으며, 액적의 수가 3개보다 5개인 경우가 더 수명시간이 길어짐을 알 수 있다. 단일 액적의 연소와 비교해보면 단일 액적에서는 미소폭발이 발생할 경우 액적이 떨어져 수명시간이 단축되는 현상이 나타나지만 액적 배열 연소에서는 미소폭발이 발생하더라도 단일 액적에 비해 미소폭발이 뚜렷하게 나타나지 않는 것은 액적 상호간에 열 유동으로 미소폭발이 진행되는 과정에 액적상호간에 연소를 촉진하기 때문에 미소폭발이 약해지는 것으로 추측할 수 있다.

3-3. 물의 함량에 따른 전연소기간 특성

액적이 일정한 위치로 이동하게 되면 전기로의 하부에 설치된 슈트가 개방되고 전기로가 일정한 위치로 내려오게 되면 액적이 고온에 노출되는데 이때부터 점화 지연시간이 시작되며 액적이 점화된 후 연소가 진행 후 소화되기까지의 시간을 전연소기간(점화지연시간+수명시간)이라고 하는데 Fig. 8과 Fig. 9는 데칸에 물을 각각 10%, 20%, 30% 혼합하고 액적배열의 수량이 3개와 5개인 경우에 전연소기간의 변화를 나타내고 있다.

Fig. 8은 액적의 간격에 크게 관계없이 전반적으로 전연소기간은 일정하게 나타나고 있다. 그러나 물의 비율이 높은 30%에서는 Fig. 4에서 나타난 것처럼 점화지

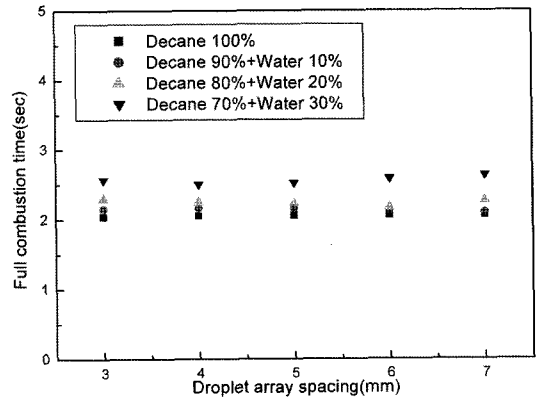


Fig. 9. Effect of droplet array spacing and water contents on full combustion time ($T_a=920$ K, $D=1.0$ mm, $n=5$).

연기간이 현저하게 길게 나타나는 관례로 전연소기간이 다른 조건에 비해 길게 나타나고 있다. 액적의 수가 5개인 경우에도 액적간의 간격에 별 영향을 받지 않아 전연소기간이 거의 일정하게 나타남을 알 수 있다.

3-4. 물의 함량에 따른 미소폭발의 특성

액적이 가열되면서 액적 속의 미세 혼합 액적이 과열 상태에 이르게 되고, 그 액적을 둘러싸고 있는 연료에 의해 물 액적의 증발이 억제되며, 어느 시점에서 연료의 억제력이 파괴되어 폭발이 일어나게 되는 현상을 미소폭발이라 하는데⁶⁾, 유화상태의 액적이 타들어감에 따라 비등점이 다른 혼합물은 차차 증발하고 높은 비중을 지닌 성분들의 농도가 높아지게 되고 액적의 온도도 높아지며 그 온도가 물의 과열한계보다 높아지면 미소폭

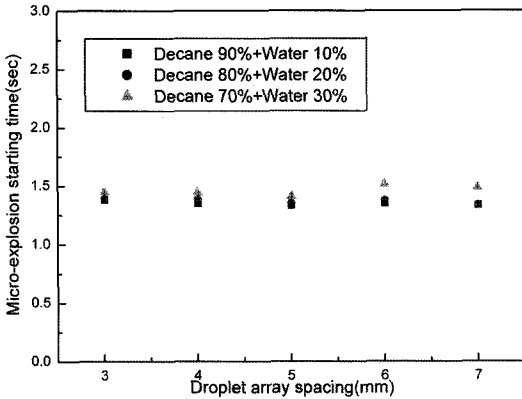


Fig. 10. Micro-explosion starting with respect to droplet array spacing and water contents ($T_a=920$ K, $D=1.0$ mm, $n=3$).

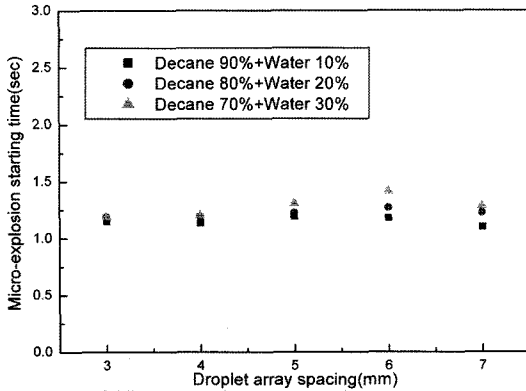


Fig. 11. Micro-explosion starting with respect to droplet array spacing and water contents ($T_a=920$ K, $D=1.0$ mm, $n=5$).

발은 일어나게 된다.

Fig. 10은 액적의 수량이 3개인 경우 물의 영향으로 미소 폭발이 처음 발생하기 시작하는 시간을 나타낸 것이다. 미소폭발의 처음 발생 시기는 액적간의 거리에 크게 관계없이 거의 일정하나 물의 함유율이 높은 30%에서는 간격이 넓어짐에 따라 지연되는 경향이 있다. Fig. 11은 액적의 수량이 5개인 경우 물의 함량에 따른 미소폭발이 처음 발생하기 시작하는 시간을 나타낸 것으로 미소폭발의 처음 발생 시기는 3개인 경우와 거의 비슷한 경향을 나타내는데 물의 비율이 높은 30%에서도 약간씩 지연되는 경향을 나타내고 있다. 액적의 수가 많은 5개인 경우가 3개에 비해 미소폭발의 발생시기가 빠르게 나타나며, 그리고 Fig. 3에서 나타낸 것처럼 물의 비율이 증가할수록 미소폭발이 점점 더 강하게 나타난다.

4. 결 론

일치된 액적 배열의 화염 퍼짐에 관한 실험에서 다음과 같은 결과들이 얻어졌다.

(1) 액적 배열에서 물의 함유비율이 높은 30%에서는 단일 액적에서와 마찬가지로 점화지연현상이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 액적간의 간격이 넓을수록 점화지연 현상이 현저하게 증가함을 알 수 있다. 그리고 액적간의 간격이 좁을수록, 액적의 수량이 많을수록 점화지연시간은 짧아진다.

(2) 단일 액적에서는 미소폭발의 영향으로 액적이 떨어지는 현상이 발생하여 수명시간이 짧아지나, 액적 배열에서는 미소폭발이 발생하더라도 단일 액적에 비해 뚜렷하게 나타나지 않으며 액적 상호간에 열 유동의 형성으로 미소폭발이 진행되는 과정에서 연소를 촉진시키는 역할을 하는 것으로 추측되며 액적간의 간격이 넓어질수록 수명시간은 점점 더 짧아진다.

(3) 전연소기간은 액적의 수량이 3개인 경우 물의 비율이 30%에서 뚜렷한 점화지연시간의 증가로 전연소기간의 현저한 증가를 제외하고는 전반적으로 전연소기간은 거의 일정하게 나타남을 알 수 있다.

(4) 미소폭발의 특성을 살펴보면 액적의 수량이나 액적간의 거리에 크게 관계없이 미소폭발의 최초 발생 시기는 거의 일정하나 물의 함유비율이 높은 30%에서는 약간 지연되는 경향이 있다. 액적의 수가 5개인 경우 미소폭발의 최초 발생 시기는 액적의 간격에 따라 약간씩 지연되는 경향이 있다. 그리고 Fig. 3에서 나타낸 것처럼 물의 비율이 증가할수록 미소폭발이 점점 더 강하게 나타나며, 액적의 수가 많을수록 미소폭발의 발생 시기는 약간씩 빨라지는 경향을 보이고 있다.

후 기

이 논문은 순천대학교 공과대학 학술재단과 2006년도 교육인적자원부의 지방대학 혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Seo, H.J.; Oh, S.M.; Huh, H.I. Transactions of the KSME, 2002, 10(4), 60.
2. Dryer, F.L. Sixteenth Symp.(Int.) on Combustion, 1977, 279.
3. Cook, D.H.; Law, C.K. Combust. Sci. and Technol., 1978, 18(5), 217.
4. Nakanishi, R.; Kobayashi, H.; Kato, S.; Niioka, T. Twenty-fifth Symp.(Int.) on Combustion, 1994, 447.

5. Okajima, S.; Kumagai, S. Nineteenth Symp.(Int.) on Combustion, 1982, 1021.
6. Jeong, I.C.; Lee, K. H. Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, 2007, 15(1), 49.
7. Reichenbach, R; Squires, D.; Penner, S.S. Eighth Symp.(Int) on Combustion, 1962, 1068.
8. Brzustowski, T.A.; Sobiesiak, A.; Wojcicki, S. Eighteenth Symp.(Int.) on Combustion, 1981, 265.
9. Okajima, S.; Kimoto, T.; Abe, K.; Yamaguchi, S. JSME Trans. B, 1989, 47(422), 2058.
10. Hanai, H.; Watanabe, H.; Kobayashi H.; Niioka, T. 2nd Pan Pacific Basin Workshop on Microgravity Sciences, 2001, Paper CC-1131, 1-11.
11. Park, J.; Hyun, D.S.; Kobayashi, H.; Niioka, T. Transactions of the KSME, 1999, 23(1), 131.