

단일 유화액적에서의 분위기 온도와 액적크기에 따른 자발화와 미소폭발의 영향

정인철¹⁾ · 이경환^{*2)}

순천대학교 대학원¹⁾ · 순천대학교 우주항공학과²⁾

Effect of Ambient Temperature and Droplet Size of a Single Emulsion Droplet on Auto-ignition and Micro-explosion

Incheol Jeong¹⁾ · Kyung-Hwan Lee^{*2)}

¹⁾Graduate School, Suncheon National University, Jeonnam 540-742, Korea

²⁾Department of Aerospace Engineering, Suncheon National University, Jeonnam 540-742, Korea

(Received 24 March 2006 / Accepted 10 August 2006)

Abstract : The characteristics of auto-ignition and combustion process of a single droplet of emulsified fuel suspended in a high-temperature air chamber have been investigated experimentally with various droplet sizes, surrounding temperatures, and water contents. The used fuels was n-Decane and it was emulsified with varied water contents whose maximum is 30%. The high-speed camera has been adopted to measure the ignition delay and flame life time. It was also applied to observe micro-explosion behaviors. The increase of droplet size and chamber temperature cause the decrease of the ignition delay time and flame life-time. As the water contents increases, the ignition delay time increases and the micro-explosion behaviors are strengthened. The starting timings of micro-explosion and fuel puffing are compared for different droplet sizes and the amount of water contents.

Key words : Emulsion droplet(유화액적), Auto-ignition(자발화), Ignition delay(점화지연), Life time(수명시간), Micro-explosion(미소폭발)

Nomenclature

T_a : ambient temperature(K)
 T_b : boiling temperature(K)
 D : equivalent diameter(mm)
 I/D : ignition delay

1. 서론

현재 사용되고 있는 연료 중 액체연료가 차지하고 있는 비중은 대단히 크다. 특히, 고갈되어가고 있

는 석유 에너지 자원의 효율적인 이용을 위해서는 이제까지 큰 역할을 하지 못하였던 비교적 휘발성이 낮은 고비등점 액체연료의 사용이 활발해야 하는데 이러한 저휘발성 액체연료가 가지고 있는 문제점은 기화가 잘 안되므로 착화가 어렵고 연소 시 배출되는 여러 가지 배출물질이 많다는 것이다. 이러한 문제점의 해결을 위해서는 액체연료의 기화, 즉 미립화(atomization)와 증발과정을 향상시켜야 하는 과제가 있다. 액체연료의 기화를 촉진시키는 방법의 하나로 액체연료에 소량의 물을 첨가하는 방법이 시도되고 있는데, 물을 실제의 디젤엔진이나 연소기에서 연료에 첨가시켜 연소시킨 결과, 연

*Corresponding author, E-mail: khlee@sunchon.ac.kr

소효율에는 큰 영향을 주지 않으면서 매연물질(Soot), 질소산화물(NOx), 황화합물(SOx), 일산화탄소(CO) 등의 공해물질의 배출이 억제 되었다고 보고되었다.¹⁻³⁾

따라서, 본 연구는 데칸(n-Decane)에 물을 혼합하는 단일 유화 액적(single emulsion droplet)의 연소상태를 연구하고자 한다. 액적이 고온에 노출되어 점화되기 전까지 지연되는 시간(ignition delay)과 액적이 점화한 후 소화되기 전까지의 시간인 수명시간(lifet ime), 점화지연시간과 수명시간의 합인 전연소시간(full combustion time) 그리고 연소 시 발생하는 미소폭발(micro-explosion)현상⁴⁾을 파악하여 순수한 연료와 유화 연료의 연소특성을 비교하고 데칸에 물을 혼합하여 연소하는 경우 물의 혼합비율이 연소과정에 나타나는 점화지연, 수명시간, 미소폭발 등에 어떠한 영향을 주는가를 비교하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구를 위한 전체적인 실험 장치는 Fig. 1에 나타내고 있다. 실험 장치를 크게 분류하면 액적을 일정한 온도에서 연소하기 위한 전기로(연소실), 만들어진 액적을 점화하기에 알맞은 위치로 이동하기 위해 스텝 모터의 구동에 의해 작동되는 자동 이송장치, 전기로를 일정한 높이로 상하왕복 시키는 유압구동장치, 그리고 전기로의 상하 이송거리를 제어하는 상하 리미트 장치와 전기로의 하부를 열고 닫아주는 슈트 개폐장치 등이 있으며 고속 비디오 카메라와 컴퓨터(PC)로 구성되어 있다. 연소실 내부의 크기는 가로와 세로가 260mm, 길이 410mm이

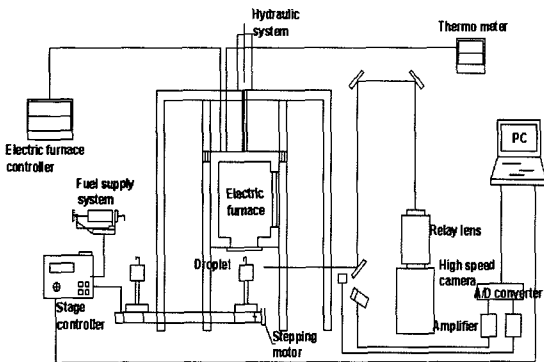


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

고 연소실벽의 두께는 20mm이다. 연소실에는 직경이 200mm인 1개의 관찰 창을 갖는데, 액적의 점화상태를 관찰하여 고속으로 연소과정을 촬영하기 위한 석영 유리창이 부착되어 있다.

시험에 사용된 연료의 특성은 Table 1에 나타나 있으며, 액적을 고온의 연소실에 노출하여 매달기 위해 실리카 파이버(silica fiber)로 제작된 서스펜더(suspender)를 외경 1.2mm의 세라믹 판에 고정하여 지그위에 장착한다. 서스펜더의 직경은 $150 \pm 10 \mu\text{m}$ 이고 용이한 액적 부착을 위해 끝부분은 약간 크게 하여 $300 \pm 10 \mu\text{m}$ 의 구형으로 가공하였다. 연료 공급계는 $50 \mu\text{l}$ 의 내부 용적을 갖는 미소 주사기(microliter syringe)의 이송거리를 정교하게 제어하기 위해, 스텝 모터로 작동되는 4축 자동 이송기를 제작하여 미소 주사기의 위치와 연료공급량을 조정하였다. 4축 자동 이송기의 작동 시작에 의해 서스펜더의 위치를 먼저 감지하고 컴퓨터로부터 명령에 의해 필요한 양의 연료가 서스펜더에 공급된다. 사용된 연료는 데칸과 물을 혼합한 유화연료이다. 서스펜더에 공급된 액적은 대체적으로 약간 타원형의 형태를 갖기 때문에, 다음과 같은 식으로 구해지는 겹점된 등가 직경을 사용하여 액적의 크기를 결정한다.^{5,6)}

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

여기서 D_1 , D_2 는 각각 액적의 단경과 장경을 나타내고 있다. Fig. 2는 액적이 전기로 아래로 이동이 완료된 후 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

Table 1 Properties of tested fuel

Fuel	n-Decane
Symbol for element	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{CH}_3=142.28$
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

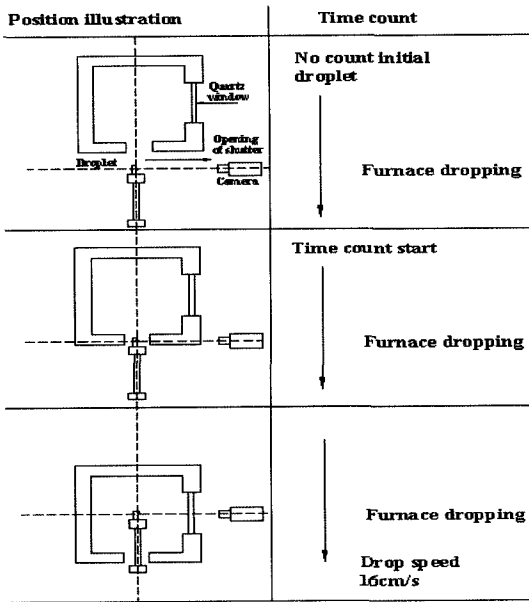


Fig. 2 Illustration of time count

위 전기로 벽돌층의 증압에 일치할 경우 센서에 의해 자동으로 작동하도록 되어있다. 전기로의 낙하 속도는 16cm/s이며 카메라의 촬영속도는 250~500fps이다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 분위기 온도에 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 증발이 거의 이루어지지 않다가 활발한 증발이 순간적으로 나타나기 때문에 혼합과 화학반응시간은 무시 될 수 있다. 액적 직경이 작은 경우 연료 증기의 질량 유속이 급격히 증가하기 때문에 화학 반응시간이 길어지게 된다. 따라서 휘발성이 강한 연료의 과다한 증발은 오히려 점화지연시간을 지체할 수 있다.

분위기 온도에 따라 점화지연에 미치는 영향을 비교하기 위하여 분위기 온도를 920K, 970K, 1020K, 1070K로 변경하고 또한, 물의 혼합비율에 따라 점화지연에 미치는 영향을 비교하기 위하여 주 연료인

데칸에 물을 각각 0%, 10%, 20%, 30%의 혼합하여 온도에 따라서 그리고 물의 혼합비율에 따라서 점화지연에 어떠한 영향을 미치는가를 파악하기 위하여, 고속촬영에 의하여 점화지연시간을 측정할 결과를 각각의 조건에 따라 Fig. 3에서부터 Fig. 6까지 도시하였다. 저온에서는 비교적 물의 영향을 비교적 많이 받아 점화지연현상이 뚜렷하게 나타나지만, 고온으로 갈수록 비등점이 낮은 물이 먼저 증발하게 되므로 물의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다.

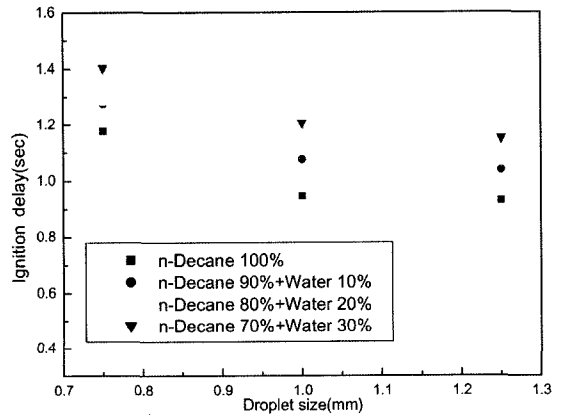


Fig. 3 Effect of droplet size and water contents on ignition delay ($T_a = 920K$)

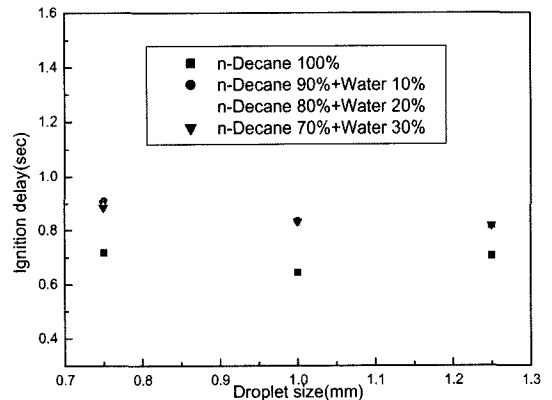


Fig. 4 Effect of droplet size and water contents on ignition delay ($T_a = 970K$)

3.2 분위기 온도에 따른 수명시간 특성

액적의 점화지연시간이 지난 후 점화하기 시작하여 소화가 완료될 때까지의 시간을 수명시간이라 하며 Fig. 6에서 Fig. 9까지의 경우를 보면 액적 사이

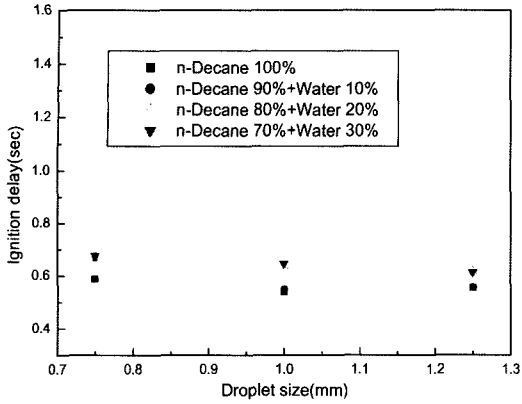


Fig. 5 Effect of droplet size and water contents on ignition delay ($T_a = 1020K$)

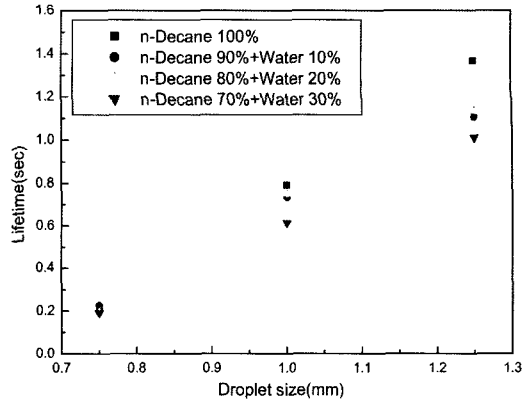


Fig. 8 Effect of droplet size and water contents on lifetime ($T_a = 970K$)

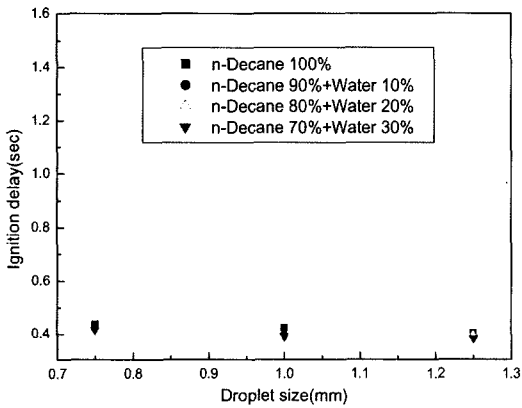


Fig. 6 Effect of droplet size and water contents on ignition delay ($T_a = 1070K$)

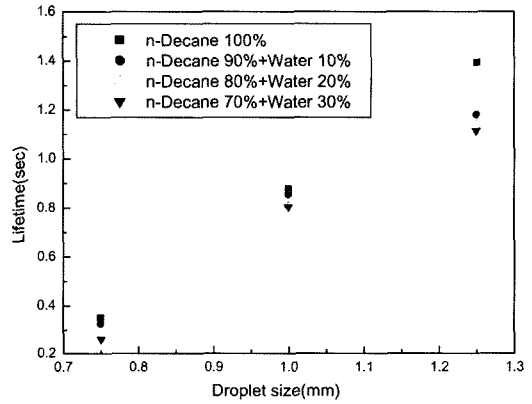


Fig. 9 Effect of droplet size and water contents on lifetime ($T_a = 1020K$)

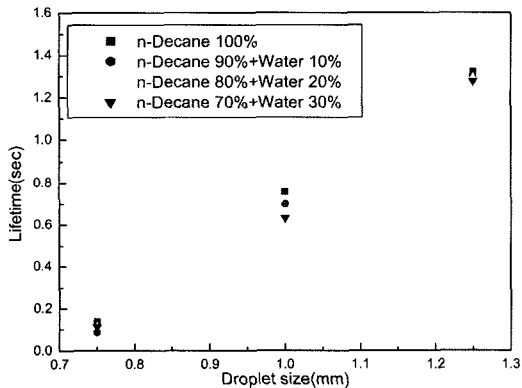


Fig. 7 Effect of droplet size and water contents on lifetime ($T_a = 920K$)

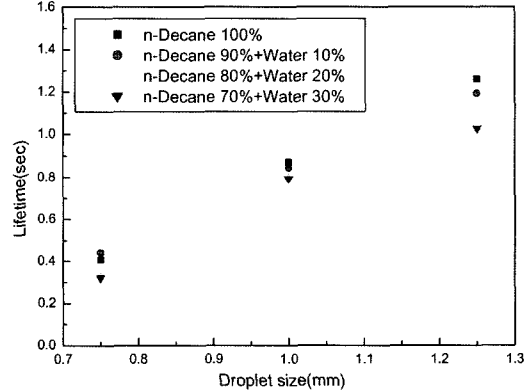


Fig. 10 Effect of droplet size and water contents on lifetime ($T_a = 1070K$)

즈가 적을 때($D=0.75mm$)는 물의 함량에 따른 수명 시간이 크게 영향을 받지 않으나, 분위기 온도에 따

라서는 약간씩 증가한다. 즉, $D=0.75mm$ 일 때 분위기 온도가 $970K$ 인 경우는 수명시간이 약 0.2 초 정도

인데, 1070K인 경우에는 약 0.4초 정도로 증가하는 것을 알 수 있다. 같은 액적사이즈에서는 물의 함량이 증가할수록 미소폭발의 영향으로 수명시간이 짧아지나 분위기 온도가 높아지더라도 온도에 대해서는 크게 영향을 받지 않는다.

3.3 분위기 온도의 변화에 따른 전연소시간 (full combustion time) 특성

Fig. 11~14는 각각의 연료에 대해서, 분위기 온도를 변화시켜 가면서 연소시켰을 때 나타나는 전연소시간의 변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 분위기 온도에 관계없이 액적이 커짐에 따라 전연소시간이 길어지는 일반적인 경향을 보여 준다. 사용 연료에 그다지 관계없이 분위기 온도가 저온일 때는 전연소시간이 길어지는 현상을 볼 수 있는데, 이

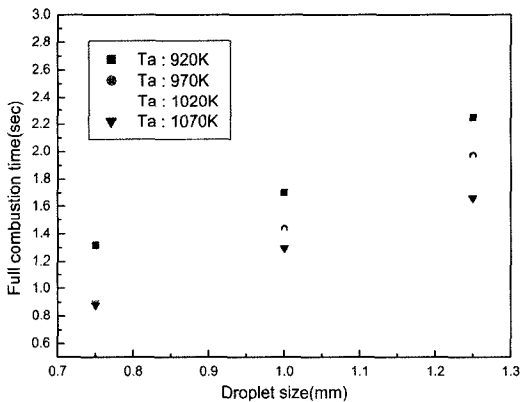


Fig. 11 Effect of droplet size and ambient temperature on full combustion time(Decane 100%)

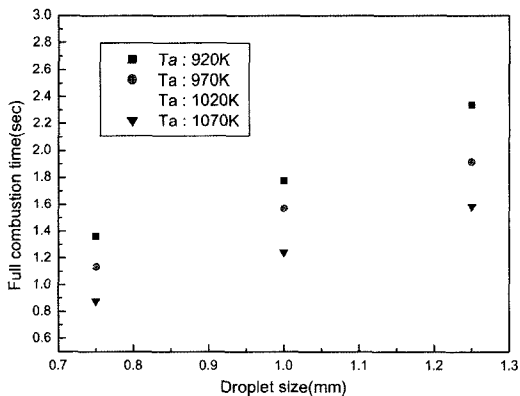


Fig. 12 Effect of droplet size and ambient temperature on combustion time(Decane 90%+Water 10%)

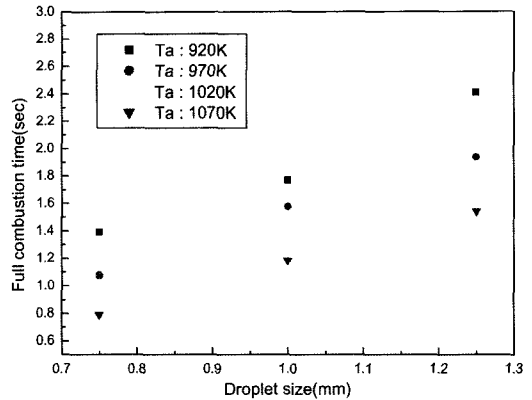


Fig. 13 Effect of droplet size and ambient temperature on combustion time(Decane 80%+Water 20%)

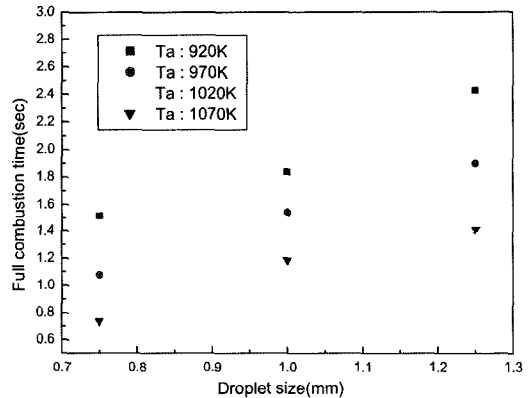


Fig. 14 Effect of droplet size and ambient temperature on combustion time(Decane 70%+Water 30%)

경우 점화지연은 아주 길어지는 반면 수명시간은 크게 변동이 없기 때문에 전연소시간이 길어지는 결과를 볼 수 있다. 분위기 온도가 높아질수록 점화지연과 수명시간은 점점 짧아져서 결국은 전연소시간이 짧아지게 된다.

3.4 미소폭발 특성

액적이 가열되면서 액적 속의 혼합물이 과열상태에 이르게 되고 그 액적을 둘러싸고 있는 연료에 의해 물 액적의 증발이 억제되다가 어느 시점에서 연료의 억제력이 파괴되어 폭발이 일어나게 되는 현상을 미소폭발이라고 한다. 유화상태의 액적이 타들어감에 따라 비등점이 낮은 혼합물은 차차 증발하고 높은 비등점을 지닌 성분들의 농도가 높아지게 되고 액적의 온도도 높아지며 그 온도가 물의 과

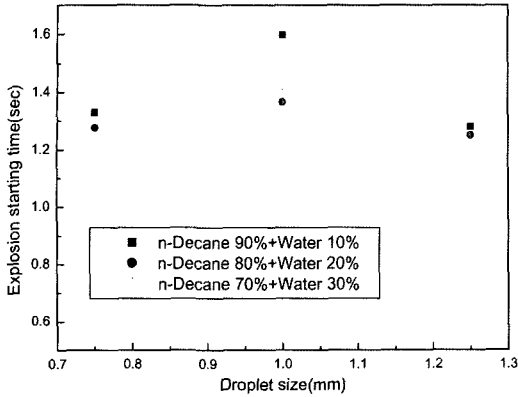


Fig. 15 Micro-explosion starting with respect to droplet size and water contents(T_a = 920K)

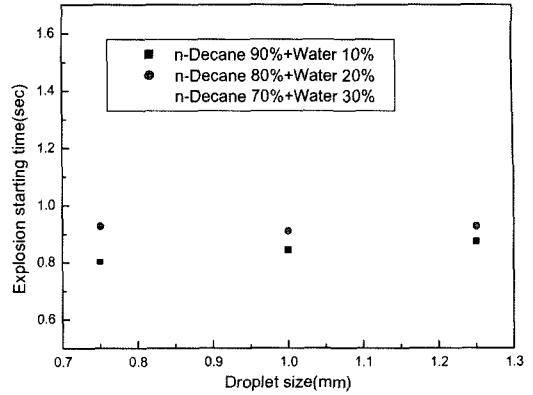


Fig. 17 Micro-explosion starting with respect to droplet size and water contents(T_a = 1020K)

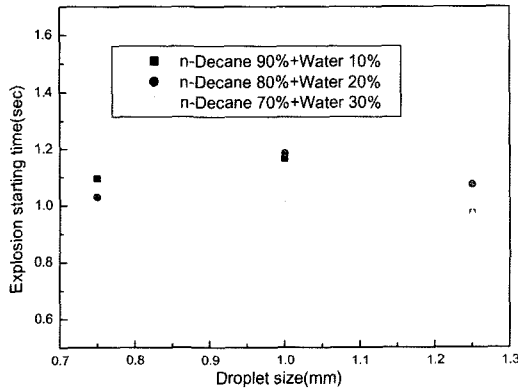


Fig. 16 Micro-explosion starting with respect to droplet size and water contents(T_a = 970K)

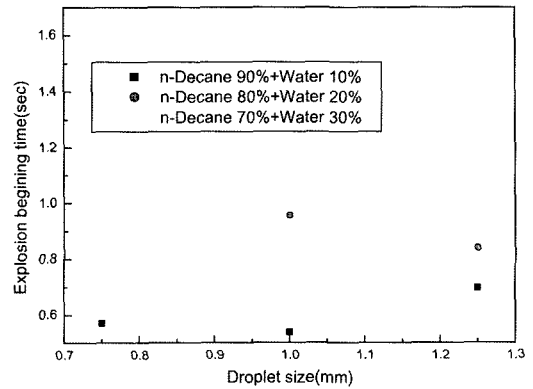


Fig. 18 Micro-explosion starting with respect to droplet size and water contents(T_a = 1070K)

열한계보다 높아지면 미소폭발은 일어나게 된다. Fig. 15~18을 살펴보면 액적크기가 D=0.75mm이고 분위기 온도가 920K 물의 함량이 30%이거나, 분위기 온도가 1070K, 물의 함량이 20%일 때는 미소폭발이 발생하지 않는다. 그러나 액적사이즈가 같을 때 분위기 온도가 높아질수록 물의 함량이 10%부터 30%까지 미소폭발이 전체적으로 일어난다. 분위기 온도가 증가함에 따라 액적사이즈에 관계없이 대체적으로 미소폭발이 발생하는 시기는 점점 더 빨라진다. 물의 함량이 증가할수록 미소폭발이 발생할 때 강도의 세기는 점점 더 강해지는 것을 알 수 있다. Fig. 19는 액적이 점화가 시작되어 연소하는 장면을 촬영한 것들 중에서 대표적인 사진을 나타낸 것이다. 그림 순서에 따라 데칸 100%, 90%, 80%, 70%에 물을 각각 10%, 20%, 30%를 혼합하여 연소 시 미소

폭발이 발생하는 장면을 나타낸 것으로 비교적 온도가 높고 물의 함량이 많을 때 미소폭발은 강하게 나타난다.

4. 결론

비교적 휘발성이 낮은 데칸을 사용하여 단일 액적으로 분위기 온도와 액적사이즈를 변화시켜가면서 데칸에 물을 각각 0%, 10%, 20%, 30% 혼합시켜 연소시켰을 때 나타나는 점화 지연, 수명시간, 전연소시간, 미소폭발에 대한 특성을 파악하였다.

- 1) 유화 액적의 점화지연은 분위기 온도, 액적의 크기와 밀접한 관계가 있다. 그리고 액적의 크기가 너무 작으면 유속의 급격한 증가로 점화지연을 유발하게 된다.
- 2) 유화 액적 연소에서 점화지연은 온도가 낮을수

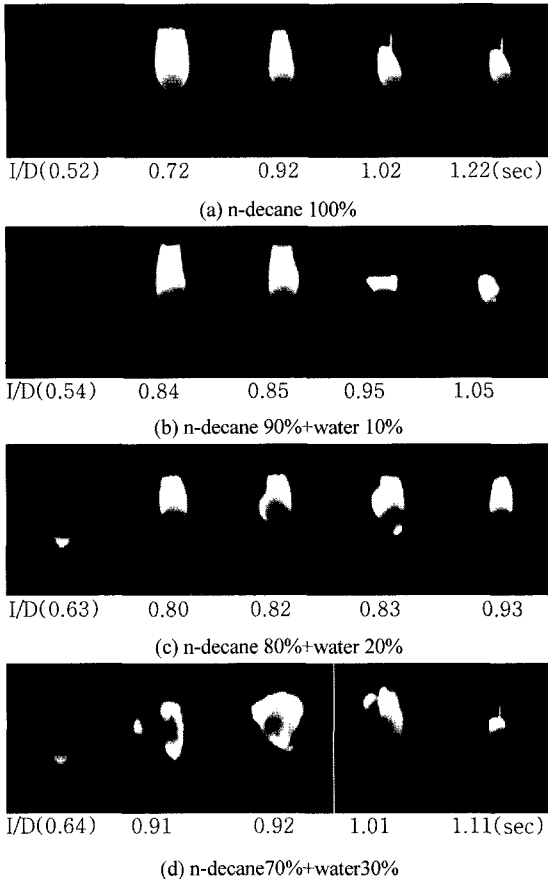


Fig. 19 Direct photographs of combustion behavior for emulsified n-Decane droplets ($D=1.0\text{mm}$, $T_a = 1020\text{K}$)

록, 액적의 크기가 작을수록, 물의 비율이 증가할수록 뚜렷하게 나타난다. 분위기 온도가 높아질수록 물의 비율로 인해 점화가 지연되는 시간의 차이가 거의 없었는데 이것은 물과 연료가 거의 동시에 연소가 이루어짐을 알 수 있다.

- 3) 수명시간은 분위기 온도가 높을수록 액적의 크기가 커질수록 그리고 물이 차지하는 함유비율에 많은 영향을 받는다. 같은 액적사이즈에서는 분위기 온도의 영향보다 물이 차지하는 비율이 더 많은 영향을 받는다. 이것은 물의 비율이 높을수록 미소폭발이 강하게 나타나기 때문에 수명시간은 짧아진다.

- 4) 액적 사이즈가 $D=0.75\text{mm}$ 인 경우 분위기 온도가 920K , 물의 함량이 30%일 때, 분위기 온도가 1070K , 물의 함량이 20%일 때는 미소폭발현상이 발생하지 않는다. 분위기 온도가 증가함에 따라 미소폭발현상은 액적사이즈에 크게 관계없이 미소폭발현상의 발생 시기는 점점 더 빨라진다.

후 기

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

References

- 1) H.-J. Seo, S.-M. Oh and H.-I. Huh, "Spray Characteristics and Exhaust Emission Tests for a Diesel Engine Using Emulsified Fuels," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp.60-68, 2002.
- 2) F. R. Dryer, "Water Addition to Practical Combustion System Concepts and Applications," 16th Symposium(Int.) on Combustion, pp.279-295, 1976.
- 3) D. H. Cook and C. K. Law, "A Preliminary Study on the Utilization of Water-in-Oil Emulsion in Diesel Engines," Combustion Science and Technology, Vol.18, No.5, pp.217-221, 1978.
- 4) C. K. Law, C. H. Lee and N. Spinivasan, "Combustion Characteristics of Water-in-Oil Emulsion Droplets," Combustion and Flame, Vol.37, p.125, 1980.
- 5) T. Tsukamoto and T. Niioka, "Dynamics of Heterogenous Combustion and Reacting System," Progress in Aeronautics and Astronautics, AIAA, Vol.152, p.263, 1993.
- 6) R. Nakanishi, H. Kobayashi, S. Kato and T. Niioka, "Ignition Experiment of a Fuel Droplet in High-Pressure High Temperature Ambient," 25th Symp.(Int.) on Comb., The Combustion Institute, p.447, 1994.