

유화액적 연료의 점화와 미소폭발의 특성

정인철¹ · 이경환[†]

(원고접수일 : 2012년 6월 28일, 원고수정일 : 2012년 10월 30일, 심사완료일 : 2013년 1월 17일)

Characteristics of ignition and micro-explosion for droplets of water-in-fuel emulsion

Incheol Jeung¹ · Kyung-Hwan Lee[†]

요약: 데칸에 물을 혼합하여 일정한 크기와 간격으로 액적을 형성하여 물과의 혼합비율, 분위기 온도, 액적의 크기와 간격 등이 유화액적의 점화와 미소폭발의 특성에 어떠한 영향을 주는가를 고온의 연소실에서 특성을 비교하였다. 점화가 시작하는 온도는 물의 비율이 낮을수록, 액적 크기가 클수록 낮아진다. 물의 혼합비율에 따른 수명시간은 단일 액적에서는 미소폭발의 영향으로 수명시간이 현저하게 짧아지나, 액적크기가 크고 분위기온도가 높을수록 미소폭발의 발생빈도는 자주 나타나게 된다. 퍼짐시간은 물의 혼합비율이 적을수록 더 빨라지고 서스펜더의 수가 많을수록 더 짧아짐을 알 수 있다.

주제어: 유화연료, 액적, 점화지연시간, 전연소기간, 미소폭발

Abstract: The water-in-fuel droplets were applied to investigate the effect of mixing ratio between water and decane, ambient temperature, droplet size and spacing between droplets on ignition and micro-explosion in a heated chamber with high temperature. The ignition temperature of droplet was found lower as the droplet size was increased and the contents of water was decreased. The life time of droplet, however, decreases as the contents of water increases due to the micro-explosion. The occurrence of micro-explosion also increases as the size of droplets and the ambient temperature increase. The flame spread speed gets faster as the contents of water and the number of suspender decreases.

Keywords: Water-in-fuel emulsion, Droplet, Ignition delay, Full combustion time, Micro-explosion

1. 서론

고유가로 에너지 절약 및 환경오염 문제 등을 줄이고 연소성능을 향상시키면서 연료 소비를 저감시키는 연구가 계속되고 있으며 특히 석유계 연료에 물을 혼합시켜 만든 유화유(emulsified fuel)가 그 중의 한 분야로 주목받고 있다. 이와 같이 소량의 물을 첨가하는

유화유를 사용하여 내연기관 등에서 연소시킬 때 전체 시스템에는 큰 영향을 주지 않으면서 열효율은 거의 저하시키지 않고 질소산화물(NOx), 입자성 물질 등을 동시에 저감시키는 방법이 많이 시도되고 있다[1][2]. 이것은 연소과정에서 유해 배기가스의 배출을 저감시키며, 물의 영향으로 화염온도(flame tempera-

† 교신저자: (540-742) 전남 순천시 중앙로 413

순천대학교, 기계우주항공공학부, E-mail: khlee@sunchon.ac.kr, Tel: 061-750-3822

1 대한건설기계안전관리원, E-mail: jeonginch@hanmail.net, Tel: 061-745-4112

ture)를 낮추고, 물의 급격한 증발에 의한 유적의 2차 미립화 현상인 미소폭발현상(micro-explosion)을 이용하여 연소효율(combustion efficiency)을 극대화시켜 엔진효율을 향상시키는 역할을 하고 있기 때문에 연소 효율을 효과적으로 개선시키는 방법으로 미소폭발현상이 강조되고 있다[2].

유화유는 지난 10여년간 NO_x 및 매연저감기법으로 실제 자동차, 산업용 버너, 플랜트 버너(plant burner), 화재 방재 등에 사용되고 있으며 기초 설계 데이터의 부족으로 때로는 연소재 혹은 점화의 억제제(inhibitor)로 혹은 증진제(combustion enhancer)로 작용하는 등 근원적 연구가 절실히 요구되는 분야라 할 수 있다. 유화유의 연소현상들이 매우 복잡하고 서로 얽혀있는 상황이므로 절대적으로 시스템 매개변수 연구가 필수적이다. 산업계에서 이용되는 모든 분무연소에 유화유를 적용하는 것이 NO_x와 매연 절감을 이룰 수 있는 가장 효과적인 방법임에도 불구하고, 물의 혼합비율과 함량 혹은 분사조건을 잘못 선택하여 그 효과를 반감시키는 결과들을 얻는 경우가 종종 있으므로 이에 대한 기초 설계 데이터를 파악할 필요가 있다.

분무연소에 있어서 점화 및 화염특성에 관한 연구는 다양한 부하에 대한 화염 안정성의 측면에서 매우 중요하다. 단일 액적에 대한 연구 [3]-[6]에서 매개변수로는 액적의 표면온도, 분위기 압력 [7], 액적반경의 변화, 연소속도, 점화지연, 수명시간, 화염면에서의 온도, 질량 증발률, 분위기 온도, 연료와 물의 혼합비율 [8] 등 여러 분야에서 액적에 대한 연구가 진행되고 있으며, 특히 연소기내의 초기 연소 특성에 대한 이해의 증진을 위해서는 화염 퍼짐 거동에 대한 많은 연구와 실험적 접근이 요구된다. 일차원 액적 배열에서의 화염 퍼짐 [6][9]-[11] 현상은 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 유

용한 수단을 제공하였으며[9]-[12], 미연 액적의 점화시간이 최소가 되기 위해서는 액적직경이 줄어들거나 공기유동속도가 증가해야 하는 [9] 등의 조건 등이 주어져야 한다.

본 연구는 데칸(n-Decane)에 소량의 물을 혼합한 이멀션유 액적을 만들어서 단일액적(single droplet) 및 액적 배열(droplet array)에서 연소상태를 연구하는데 그 목적이 있다. 실험은 물의 혼합비율을 달리하는 데칸의 유화연료 액적에 대하여 각기 다른 분위기 온도와 액적의 크기, 그리고 액적의 간격 등을 변수로 하였으며, 액적이 고온에 노출되어 자발화되기 전까지 지연되는 점화지연시간(ignition delay), 점화된 후 소화되기까지의 시간인 수명시간(life time), 점화지연시간과 수명시간의 합인 전연소시간(full combustion time), 미소폭발(micro-explosion) 현상, 그리고 화염퍼짐속도(flame spread speed)에 대한 특성을 파악하고자 한다.

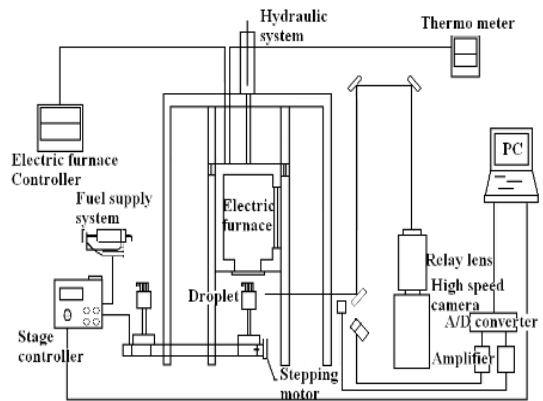


Figure 1: Schematic diagram of experimental apparatus

2. 실험장치 및 방법

본 연구를 위한 전체적인 실험장치는 기 발표된 연구결과[8]와 같이 Figure 1에 나타나고 있다. 실험 장치를 크게 분류하면, 다음과 같다.

1) 액적을 주어진 설정온도로 가열하여 연소

- 하기 위한 전기로(연소실)
- 2) 액적을 제작하는 연료공급계
- 3) 스텝모터를 구동하여 만들어진 액적을 점화하기에 알맞은 위치로 이동하기 위한 자동이송장치
- 4) 전기로를 일정한 높이로 상하왕복 시키는 유압 구동장치
- 5) 전기로의 상하 이동거리를 제어하는 상하리미트 장치와 전기로의 하부를 열고 닫아주는 슈트 개폐장치
- 6) 고속 비디오 카메라와 P/C

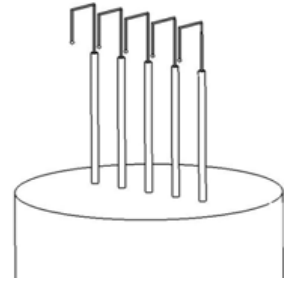


Figure 2: Schematic diagram of droplet array system

연소실 내부의 크기는 가로와 세로가 250mm, 길이 300mm, 두께는 20mm이다. 연소실에는 석영유리로 제작된 200mm직경의 1개의 관찰창이 설치되어 있어서 액적의 점화 상태를 관찰하여 고속으로 사진을 촬영할 수 있게 하였다.

연료 공급계는 소량의 연료를 공급할 수 있는 미소 주사기(microliter syringe)와 스텝모터로 작동되는 4축 자동 이송기로 구성된다. 각 서스펜더의 위치를 먼저 감지하고 P/C로부터의 명령에 의해 연료가 각 서스펜더에 공급된다. 4축 자동 이송기의 작동 시작으로부터 1개의 서스펜더에 액적 연료를 공급하게 된다. 사용된 연료는 데칸($n-C_{10}H_{22}$, 비등점=447.3K)과 물(H_2O)로 구성된 유화유인데, 상분리를 방지하기 위해 1~2%의 계면활성제를 혼합하여 교반시킨다. 서스펜더에 공급된 액적은 타원형이며 점정된 등가 직경은 다음과 같은 식으로 얻어진다[4][6].

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

여기서 D_1 D_2 는 각각 액적의 단경과 장경을 나타내고 있다.

액적배열을 생성하기 위한 구조를 Figure 2에 나타내고 있는데 π 자형으로 유리봉을 가공하여 설치하였으며 수평 일직선상에 액적을 생성하기 위해 실리카 파이버(silica fiber)로 제작된 서스펜더(suspender)가 외경 1.25mm의 세라믹 관에 고정되어 있다. 서스펜더의 직경은 $150 \pm 10 \mu m$ 이고 용이한 액적 부착을 위해 끝부분은 $300 \pm 10 \mu m$ 구형으로 가공된다.

액적이 전기로 아래로 이동이 완료된 후 점화시간을 측정하는 장면을 Figure 3에 표시한다. 전기로를 상하왕복 운동시키는 유압실린더가 작동하여 전기로 아래의 액적이 고온에 노출되는 시점부터 카메라 셔터가 작동되면서 열리고 점화지연시간이 시작되며 액적의 중심과 전기로 하부의 슈트 위 전기로 벽돌층의 상부와 일치할 경우 센서에 의해 자동으로 카메라 셔터가 작동하도록 되어있다.

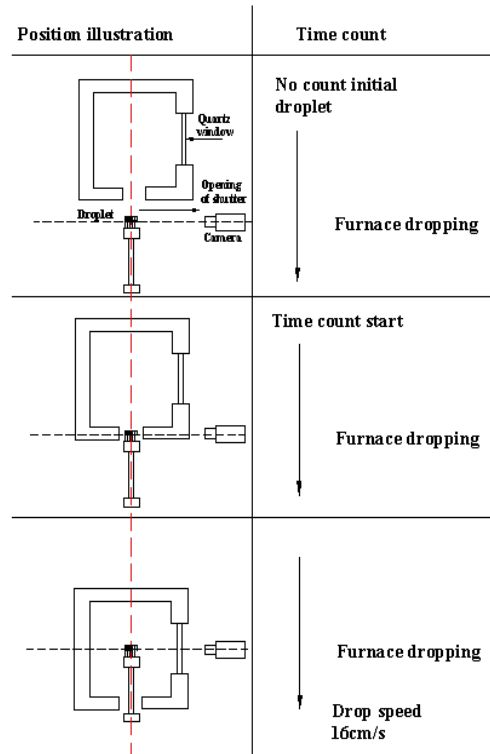


Figure 3: Illustration of time count

전기로의 낙하속도는 16cm/s이며 카메라의 촬영 속도는 250fps이다. 그리고 모든 실험은 대기압 상태에서 실행되었다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 단일액적의 점화지연 특성

일반적으로 액적 연료의 크기와 휘발성은 점화 시간에 중대한 영향을 주며, 단일 액적 연료의 점화시간은 증발시간과 화학반응시간으로 표현된다 [5]. 액적 연료가 크거나 휘발성이 작은 경우에 있어서는 액적 연료의 표면온도가 비등점(boiling point) 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 과도한 증발은 오히려 점화지연시간을 길어지게 할 수 있다. 점화는 wake 흐름지역에서 발생하고, 그 때에 반응지역은 위쪽으로 퍼지고 마지막으로 액적을 둘러싼 화염이 형성하게 된다[13].

Figure 4에서는 액적의 크기에 따른 최소점화한계온도를 나타내고 있다. 각각의 액적크

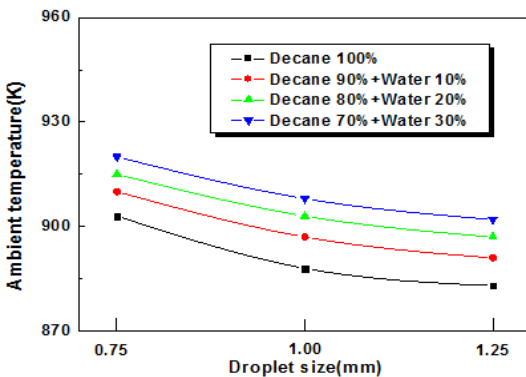


Figure 4: Auto ignition temperature of decane emulsion with respect to droplet size and water content.

와 물의 혼합비율이 다른 조건의 액적이 전기로 내에 투입되었을 때 점화되는 최소온도를 측정하였으며 0.75mm에서는 비교적 높은 온도

에서 점화가 가능하였으나 액적크기가 점점 증가하는 1.00mm, 1.25mm에서는 점화한계온도가 낮아진다. 즉 액적크기가 커질수록 증발량이 많아져 낮은 온도에서도 점화가 가능하였다. 그리고 물의 비율이 많아질수록 점화지연시간이 점점 더 증가하게 되는 것을 알 수 있다.

물의 비율이 높을수록 점화지연시간이 증가하는 원인은 데칸보다 물의 비열이 높아서 발화점까지 더 긴 열전달시간을 필요로 하기 때문이다. 그러나 0.75mm에서는 연료로부터 질량 유속이 급격히 증가하여 증발시간에 비해 화학 반응시간이 커지는 결과를 초래하여 점화지연시간이 더 연장되는 결과를 초래할 것이다.

3.2 단일액적의 연소기간의 특징

물의 혼합비율과 액적크기 그리고 분위기 온도에 따른 연소기간의 특징을 Figure 5 ~ Figure 7에 나타내고 있다. 점화지연시간은 분위기 온도가 낮을수록, 액적크기가 작을수록, 물의 비율이 높을수록 길게 나타난다. 특히 0.75mm에서는 질량유속의 증가로 더 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 액적크기 1.0mm 920K에서 물의 혼합비율이 10%씩 증가함에 따라 데칸 100%에 비해 5.3 ~ 11.5% 증가한다. 그러나 수명시간은 점화지연시간과는 반대로 3.2 ~ 9.3%씩 감소하게 된다. 점화지연시간과 수명시간이 반대현상이 나타남에 따라 전연소기간(점화지연시간 + 수명시간)은 혼합비율에 관계없이 거의 유사하게 나타난다.

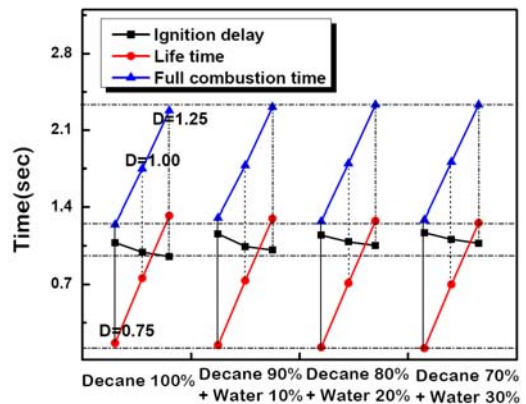


Figure 5: Effect of droplet size and water contents on full combustion time(Ta=920K)

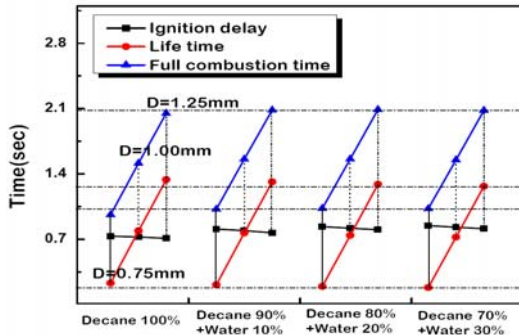


Figure 6: Effect of droplet size and water contents on full combustion time($T_a=970K$)

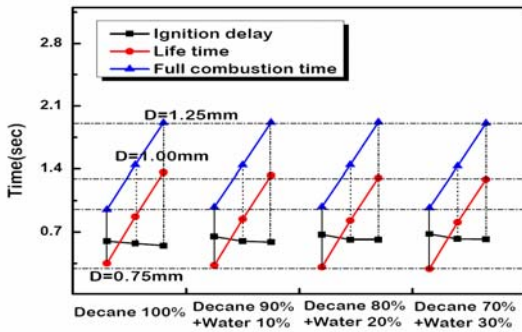


Figure 7: Effect of droplet size and water contents on full combustion time ($T_a=1020K$)

3.3 물의 혼합비율과 액적크기에 따른 미소폭발의 특성

Figure 8 ~ Figure 10에서는 분위기온도, 액적크기, 물의 혼합비율이 각기 다른 조건에서 나타나는 미소폭발현상의 발생빈도를 보여주고 있다. Figure 8에서 920K, 0.75mm에서는 1~2회 정도 약한미소폭발이 일어나지만, 1.0mm에서는 3~5회 정도의 미소폭발이 발생하게 되고 진행시간이 약간 길어진다. 1.25mm에서도 발생빈도는 1.0mm와 거의 유사하나, 진행시간이 좀 더 길게 진행된다. Figure 8 ~ Figure 10에서 미소폭발의 발생빈도를 비교해 보면 분위기 온도가 높아질수록 발생 시간은 점점 빨라지고, 발생빈도는 거의 3배에 가깝게 증가하게 된다. 분위기온도가 낮을수록 미소폭발의 발생빈도가 낮은 것은 액적이 가열되어 연소하는데 많은 시간이 소요되고 액적증발이 미리 이루어져 그만큼 액적의 크기가 작아져 미소폭발의 발생

빈도도 적어지는 것으로 추정된다. 물의 혼합비율이 많아짐에 따라 그리고 분위기 온도가 높아짐에 따라 미소폭발의 발생빈도는 자주 나타나게 된다.

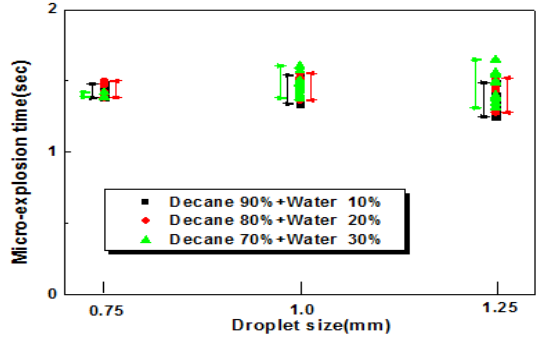


Figure 8: A currency of micro-explosion time with respect to ambient temperature and water contents ($T_a=920K$)

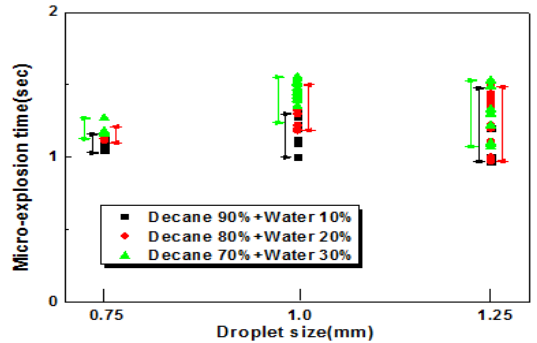


Figure 9: A currency of micro-explosion time with respect to ambient temperature and water contents ($T_a=970K$)

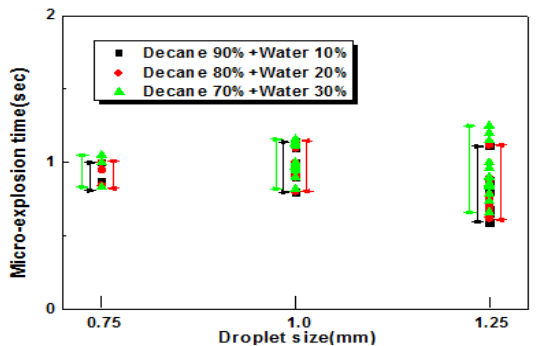


Figure 10: A currency of micro-explosion time with respect to ambient temperature and water contents ($T_a=1020K$)

진행시간도 마찬가지로 현저하게 증가하게 됨을 알 수 있고 발생시기도 넓게 분포하는 것으로 보인다. 특히 물의 혼합비율이 30%일 때 강하게 발생함을 알 수 있다.

3.4 액적의 화염퍼짐 특성

통상 중력 및 미소 중력 하에서 자연 대류의 존재 유무와 액적 배열 주위에서 형성되는 열 유동의 차이로 화염 퍼짐 거동에 상당한 영향을 줄 수 있는데, 통상 중력 하에서는 화염에 의해 형성된 자연 대류 유동에 의해 기연 액적 주위의 고온 가스는 상 방향으로 흐름이 유도되어[14] 열 경계층의 액적 배열 방향으로의 전달을 방해하게 된다.

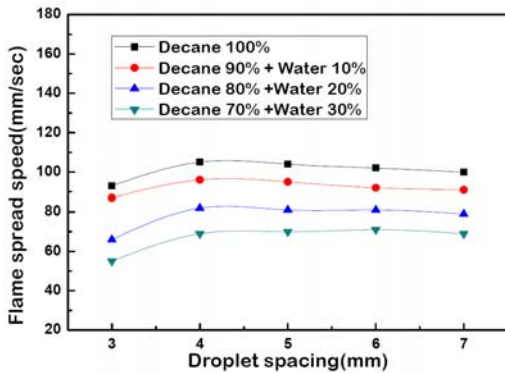


Figure 11: Variation of flame spread with droplet spacing (D=1.0mm, Ta=920K, droplet array n=3)

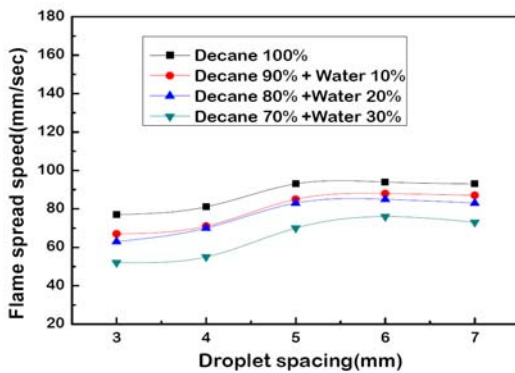


Figure 12: Variation of flame spread with droplet spacing (D=1.0mm, Ta=920K, droplet array n=5)

Figure 11은 서스펜더의 수가 3개인 경우에 화염의 퍼짐속도를 나타내고 있다. 각각의 조건에서 점화지연시간이 지난 후 액적 하부에 형성된 가스에 점화가 시작된 후 화염이 액적의 상부까지 순간적으로 전달되는 시간을 나타낸 것이다. 액적간격이 3mm에서는 액적간의 근접거리의 간섭으로 속도가 늦어지는 것을 알 수 있으며 4mm에서는 최대의 속도를 나타내다가 액적간의 간격이 멀어짐에 따라 서서히 속도가 떨어지거나 별 차이가 없는 경향을 나타내고 있다. 4mm이후부터는 근거리 액적간섭의 영향이 비교적 적게 받고 있음을 알 수 있다. 그리고 물의 비율에 따라 화염퍼짐속도가 뚜렷하게 구분되는 것을 확인할 수 있다.

Figure 12에서는 서스펜더의 수가 5개인 경우에 대한 화염퍼짐속도를 나타내고 있다. 화염의 퍼짐속도는 서스펜더 3개짜리에 비해 늦어짐을 볼 수 있는데 이것은 근거리 액적간의 간섭으로 화염의 퍼지는 속도에 영향을 받고 있음을 추측할 수 있다. 액적간격 3mm 4mm에서는 근거리 액적간의 간섭이 현저하게 작용하고 있음을 추측할 수 있다.

4. 결 론

데칸에 일정한 비율의 물을 혼합하고 주어진 온도에서 단일액적과 액적배열의 연소실험을 통해서 다음과 같은 결과를 얻어졌다.

(1) 액적크기가 커질수록 증발량이 많아져 낮은 온도에서도 점화가 가능하고 물의 혼합비율이 높아질수록 점화지연시간이 현저한 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 액적크기 1.0mm 920K에서 물의 혼합비율이 10%씩 증가함에 따라 점화지연시간은 데칸 100% 사용할 때에 비해서 5.3~11.5% 증가한다. 그러나 수명시간은 3.3%~9.3%씩 감소하게 된다.

(2) 단일액적에서 분위기온도에 따른 전연소시간은 분위기온도가 낮을수록 점화지연시간이 현저하게 증가하게 되고 반대로 수명시간은 아주 짧게되어 전연소시간은 분위기온도가 높을

수록 짧아지게 된다.

(3) 물의 혼합비율에 따른 미소폭발현상의 발생빈도를 살펴보면 액적크기가 크고 주위온도가 높을수록 그리고 물의 혼합비율이 높을수록 미소폭발은 자주 발생하게 된다. 특히 물의 혼합비율이 30%에서 현저하게 나타나는데 분위기 온도가 높을수록 열 유동이 활발하게 이루어져 분위기 온도가 미소폭발을 촉진시키는 역할을 하는 것으로 추측된다. 액적크기 0.75mm에 비해 1.0mm, 1.25mm에서는 미소폭발의 발생빈도는 거의 3배 이상 증가하게 된다.

(4) 화염의 퍼짐시간은 서스펜더의 수가 3개인 경우에 최고 퍼짐시간이 3mm의 액적간격에서, 5개인 경우에는 최고 퍼짐시간이 액적간격이 3mm 4mm에서 근접액적의 상호작용으로 화염퍼짐이 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 간격이 더 멀어지면 화염퍼짐시간이 약간 늦어지거나 변화가 없어짐을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 순천대학교 공과대학 학술재단의 지원으로 수행된 연구결과이다.

참고문헌

[1] F. L. Dryer, "Water addition to practical combustion Systems-concepts and applications", Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Combustion, pp. 279-295, 1977.

[2] 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, pp. 217-221, 1978.

[3] T. Tsukamoto and T. Niioka, "Dynamics of Heterogeneous combustion and reacting systems", Progress in Aeronautics and Astronautics, AIAA Inc., vol. 152, pp. 263-279, 1993.

[4] T. Niioka, T. Mitani, and J. Sato, "Ignition characteristic of a Two-component condensed fuel in a Stagnation-point flow", Proceedings of the Twentieth International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1877-1882, 1984.

[5] R. Nakanishi, H. Kobayashi, S. Kato, and T. Niioka, "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, 1994.

[6] S. Okajima and S. Kumagai, "Experimental studies on combustion of fuel droplets in flowing air under zero and high-gravity conditions", Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1021-1027, 1982.

[7] G. M. Faeth, D. P. Dominicus, J. F. Tulpinsky, and D. R. Olson, "Supercritical bipropellant droplet combustion", Proceedings of the Twelfth Symposium International on Combustion, The Combustion Institute, pp. 9-18, 1969.

[8] I. C. Jeong, K. H. Lee, and J. S. Kim, "Characteristics of Auto-ignition and Micro-explosion for Array of Emulsion Droplets", Journal of Energy Engineering, vol. 16, no. 3, pp. 113-119, 2007.

[9] R. Reichenbach, D. Squires, and S.S. Penner, "Flame propagation in liquid-fuel droplet arrays", Proceedings of the Eighth International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1068-1073, 1962.

[10] J. Park, H. D. Shin, H. Kobayashi, and T. Niioka, "An experimental study on flame spread in an one-dimensional droplet array", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, vol. 23, No. 1, pp. 131-139, 1999 (in Korean).

- [11] J. Park, H. Kobayashi, and T. Niioka, “A study on blend effect of fuel in flame spread along an one-dimensional droplet array”, Journal of the Korean Society of Combustion, vol. 3 no. 2 pp. 1-11, 1998 (in Korean).
- [12] T. A. Brzustowski, A. Sobiesiak, and S. Wojcicki, “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, 1981.
- [13] H. Hanai, H. Watanabe, H. Kobayashi, and T. Niioka, “Ignition of droplet array exposed to high-temperature low-speed airflow”, Proceedings of the 2nd Pan Pacific Basin Workshop on Microgravity Sciences, Paper CC-1131, pp. 1-11, 2001,
- [14] J. Park, H. D. Shin, H. Kobayashi, and T. Niioka, “Comparative study of flame spread behaviors in one dimensional droplet array under supercritical pressures of normal gravity and microgravity”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, vol. 23, No. 1, pp. 140-148. 1999.