

경유와 바이오 디젤 액적의 혼합비율과 크기에 따른 연소특성

정만석*, 이경환†

*순천대학교 대학원, †순천대학교 기계우주항공공학부
(2009년 2월 17일 접수, 2009년 7월 16일 수정, 2009년 7월 16일 채택)

Combustion Characteristics of Single Droplet of Diesel with Bio-diesel for Their Mixing Ratios and Sizes

Manseok Jeong*, Kyung-Hwan Lee†

*Graduate School, Suncheon National University

†School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon National University

(Received 17 February 2009, Revised 16 July 2009, Accepted 16 July 2009)

요 약

경유와 바이오 디젤이 혼합된 액적을 고온의 연소실에서 액적의 크기, 주위온도 그리고 각각의 혼합비율에 따라 연소특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 경유에 0%, 20%, 50%, 80%, 100%의 비율로 바이오 디젤을 혼합하여 다양한 크기의 액적을 만든 후 서스펜더에 매달고 970K에서 1070K까지 50K 간격으로 고온에서 자발화를 시키면서, 전체의 연소 과정을 고속 디지털 카메라로 촬영하여 점화지연, 수명시간, 전연소시간, 그리고 미소폭발 등의 연소 특성을 파악하였다. 액적의 크기가 증가하고 연소실 온도가 낮을수록 점화가 지연되었다. 경유에 대한 바이오 디젤의 혼합비율이 감소할수록 점화지연이 증가하였고 미소폭발 발생률도 증가하였다. 또한, 미소폭발이 발생하는 경우 전연소시간이 짧아짐을 확인하였다.

주요어 : 경유 액적, 바이오디젤, 경유, 미소폭발, 점화지연

Abstract— The combustion characteristics of a single droplet of diesel and bio-diesel have been investigated experimentally with varying droplet size, ambient temperature and compound ratio in a high temperature chamber. The fuels used were diesel with bio-diesel contents varied from 0% to 100%. Each experiment has been performed from 970K to 1070K by 50K intervals. Imaging with a high-speed digital camera was adopted to measure the ignition delay and flame life-time, as well as to observe micro-explosion behavior. The increase of droplet size and decrease of furnace temperature cause an increase of the ignition delay time. As the bio-diesel content decreases, the ignition delay increases and the micro-explosion behavior is strengthened. It is also confirmed that the full combustion time decreases as the micro-explosion occurred.

Key words : Diesel droplet, Bio-diesel, Diesel, Micro-explosion, Ignition delay

1. 서 론

화석 연료 자원의 고갈에 따른 미래 에너지 보급 위기와 더불어 대기오염물질을 저감 할 수 있는 바이오 연료

에 대한 관심과 그 시장이 점점 더 커지고 있다. 특히 자동차 분야에서 배출가스의 오염물질을 효과적으로 감소할 수 있기 때문에 이와 관련된 연구가 활발하며, 바이오 디젤에 많은 초점이 맞춰져 있다.

바이오디젤은 콩기름, 유채기름 등의 식물성 기름과 동물성 기름을 원료로 해서 만든 것으로 바이오에탄올과 함께 가장 널리 사용되고 있다. 경유를 사용하는 디젤자동차의 연료 첨가제 또는 그 자체로 차량의 연료로 사용한다. 보통 메탄올을 이용해 3가의 지방산에 글리세롤이

†To whom correspondence should be addressed
Suncheon National University, 315 Maegok-dong, Suncheon,
Jeonnam 540-742, Korea
E-mail : khlee@suncheon.ac.kr

결합한 트리글리세리드로부터 글리세롤을 분리한 다음, 지방산 에스테르를 만들어 내는 에스테르 교환방법을 통하여 만든다.

정부의 발표에서는 바이오디젤의 경우 경유와의 혼합 비율을 현 1%에서 내년에는 1.5%로 높인 뒤 2012년까지는 3%, 중장기적으로는 5%까지 높인다는 계획을 갖고 있다. 현재의 디젤 차량에 큰 개조 없이 적용이 가능하고 이와 함께 경유에 바이오 디젤 20%를 혼합한 BD20을 기준으로 할 때, 미세먼지 12~18% 감소, 매연 20% 감소 등의 대기오염 절감 효과가 있다고 보고되고 있다. 물론 단점도 있다. 겨울철 유동점 및 필터 막힘 점이 기존 경유에 비해 높다는 것과 질소산화물(NO_x) 배출과 연료소비를 증가의 문제 등이 있었다.⁽¹⁾

따라서 본 연구는 경유와 바이오 디젤을 혼합한 단일 액적(single droplet)의 연소과정을 파악하고자 한다. 액적이 고온에서 노출되어 점화되기 전까지 지연시간인 시간(ignition delay time), 액적이 점화 후 연소 진행과정을 거쳐 소화되기까지의 시간인 수명시간(life time), 점화지연과 수명시간의 합인 전연소시간(full combustion time), 그리고 연소 시 발생하는 미소폭발(micro-explosion) 현상⁽²⁻⁴⁾을 주변온도, 액적의 크기, 경유와 바이오 디젤 혼합비율에 따라 나타나는 변화와 특성을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구를 위한 전체적인 실험 장치는 Fig. 1에 나타나고 있다. 실험 장치를 크게 분류하면 액적을 일정한 온도에서 연소하기 위한 연소실(전기로), 일정한 크기로 만들어진 액적을 점화하기에 알맞은 위치로 이동하기 위해 서보 모터의 구동에 의해 구동되는 자동 이송장치, 전기로를 일정한 높이로 상하왕복 시키는 유압구동장치, 그리고 전기로의 상하 이송거리를 제어하는 상하 리미트 장치와 전기로의 하부를 열고 닫아주는 슈트 개폐 장치 등이 있으며 조명장치와 고속 카메라, PC로 구성되어 있다. 연소실 내부의 크기는 가로와 세로가 250mm, 길이 300mm, 두께는 20mm이다. 연소실에는 200mm직경의 1개의 관찰 창을 갖는데, 액적의 점화 상태를 관찰하고 고속 사진 촬영을 하기 위하여 석영 유리창을 사용 하였다. 수평 일직선상에 액적을 생성하기 위해 실리카 파이버(silica fiber)로 제작된 서스펜더(suspender)를 외경 1.25mm의 세라믹 관에 고정하였다. 서스펜더의 직경은 150±10 μ m 이고 액적 부착을 위하여 끝부분은 300±10 μ m 구형으로 가공하였다. 연료 공급계는 50 μ l의 내부 용적을 갖는 미소 주사기(microliter syringe)와 서보 모터로 작동되는 4축 자동 이송기로 구성된다. 서스펜더의 위치를 먼저 감지하고 PC의 명령에 의해 연료가 서스펜더에 공급된다.

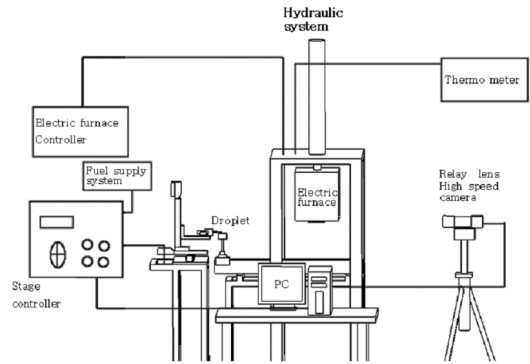


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1. Properties of tested fuel

Properties	Diesel	Bio-diesel
Lower heating value [kJ/kg]	141.248	125.969
Oxygen [Wt%]	0	11
Density [lb/gal @15°C]	7.079	7.328
Sulfur [Wt%]	0.05 max	0.0024 max
Carbon [Wt%]	86.76	77.25
Hydrogen [Wt%]	13.05	11.83
Cetane Number	40~55	48~65
Stoichiometric AF ratio	15	13.8

실험에 사용된 연료는 경유와 바이오 디젤이다. 주 연료인 경유와 바이오 디젤의 특성은 Table 1에 나타나 있다. 서스펜더에 공급된 액적은 타원형이며 검정된 등가 직경은 다음과 같은 식으로 얻어진다.^(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 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 벽돌 층의 상부와 일치 할 때 센서에 의해 자동으로 작동하게 된다. 전기로의 낙하속도는 16cm/sec이며 카메라의 촬영속도는 250frame/sec이다. 그리고 모든 실험은 대기압 상태에서 실행되었다.

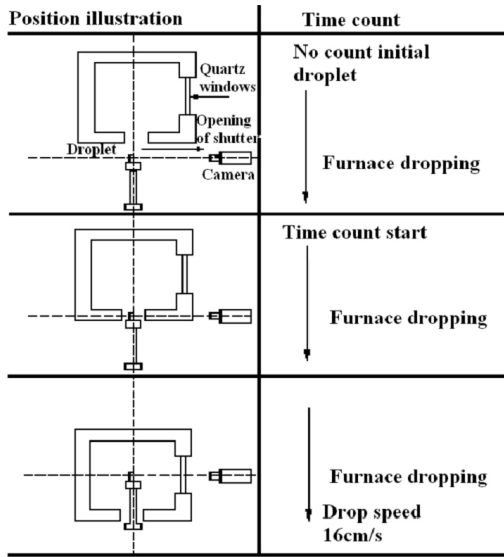


Fig. 2. Illustration of time count

3. 실험결과 및 검토

3-1. 주위온도에 따른 연소 특성

주위온도의 변화는 연소과정에 있어서 점화지연에 큰 영향을 주게 된다. 일반적으로 점화지연은 증발시간과 화학반응 시간으로 분류되며, 휘발성이 작은 액적 연료에서는 비등점(boiling temperature) 근처에 이르기까지 증발이 거의 이루어지지 않다가 순간적으로 나타나기 때문에 혼합과 화학반응시간은 무시할 수 있다.⁽⁶⁾

본 실험에서 사용한 연료인 경유와 바이오 디젤의 자발화 온도(Auto ignition temperature)를 측정하기 위하여 액적 크기를 $D=0.75$ 로 하여 실험을 실시하였다. Fig. 3에서 보는 것과 같이 경유는 970K에서 2.024초의 점화 지연 후에 처음 착화 되고, 바이오 디젤은 940K에서 2.16초의 점화지연 후에 착화되기 시작하였다. 경유와 바이오 디젤의 착화온도를 970K에서 비교하였을 때 경유는 2.024초, 바이오 디젤은 1.554초로 약 0.5초의 더 빠른 착화를 나타냈다. 이를 통해 바이오 디젤이 더 짧은 점화지연과 낮은 온도에서 점화되는 것을 알 수 있었다. 그리고 이것은 Table 1에 나타나 있는 각각의 연료가 가지고 있는 세탄가(Cetane Number)의 경향과 잘 일치됨을 알 수 있다.

주위온도에 따라 점화 지연에 미치는 영향을 비교하기 위하여 분위기 온도를 970K, 1020K, 1070K에서 각각 실험을 실시하였다. 970K에서 경유가 착화되기 시작하였기 때문에 경유와 바이오 디젤을 비교하기 위해서 970K부터 50K씩 증가 시키면서 실험을 실시하였다.

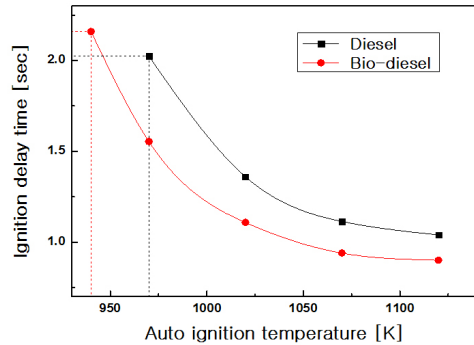
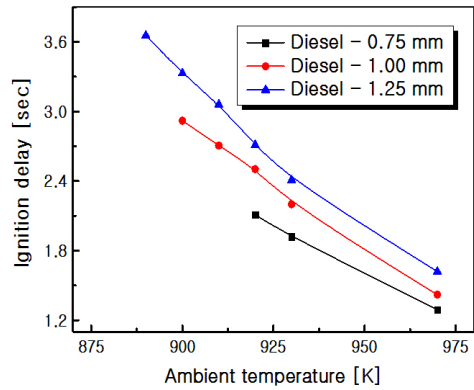
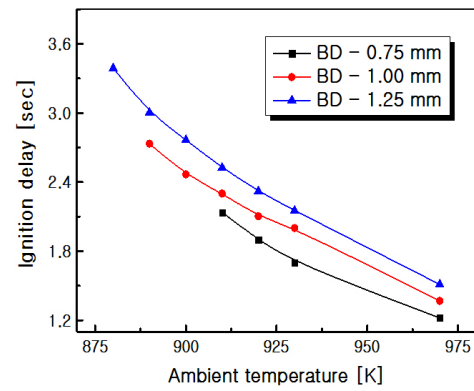


Fig. 3. Effect of droplet of fuel and ambient temperature on ignition delay ($D=0.75\text{mm}$)



(a) Diesel 100%



(b) Bio-diesel 100%

Fig. 4. Effect of droplet size and ambient temperature on ignition delay

Fig. 4는 서스펜더 주위의 온도를 400K로 상승시킨 후 경유와 바이오 디젤의 액적크기와 주변 온도변경에 따른 점화 지연을 비교한 것이다. 상온에서 실험한 결과와 같

은 경향성을 나타내었다. 하지만 경유와 바이오 디젤의 점화 지연 차이가 더 작아지고 좀 더 낮은 온도에서 착화되었다. 그리고 액적의 크기가 커짐에 따라 착화 가능 온도가 더 낮게 나타났다. 이는 액적의 크기가 작은 경우에 착화하기 전에 액적이 모두 증발되어 버리기 때문이다. 그리고 주위온도가 상승됨에 따라 점화 지연 시간이 짧아지는 것을 알 수 있었다. 한편, 점화 지연 시간이 감소한 만큼 화염 수명시간이 증가되지는 않았다. 이것은 경유와 바이오 디젤이 높은 비등점을 가지고 있어서 증발량이 적기 때문이다. 그리고 주위 온도가 높아질수록 액적 내부의 유동이 활발해져서 증발량이 커지기 때문에 점화 지연 시간이 짧아는 것으로 생각 할 수 있다.

3-2. 혼합비율에 따른 연소 특성

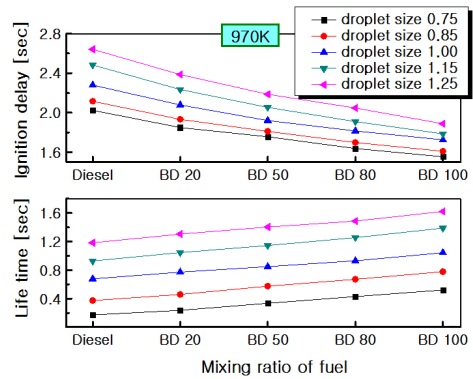
바이오 디젤의 세탄가(48~68)는 경유의 세탄가(40~55)보다 높다. 세탄가는 디젤기관용 연료로서의 경유의 착화성 정도를 나타내는 값으로 고속 디젤기관에서의 연료의 착화성은 엔진의 효율에 미치는 영향이 크므로 세탄값이 특히 문제가 되고 있다.

바이오 디젤과 경유의 혼합 비율에 따른 연소 특성을 비교하기 위하여 혼합비율을 Diesel, BD(Diesel 80% + Bio-diesel 20%) 20, BD 50, BD 80, BD 100으로 하여 위에서 언급한 온도 조건에서 실험을 실시하였다. 세탄가가 높은 바이오 디젤은 Fig. 5에서 보는 것과 같이 경유에 비하여 점화 지연이 짧았다. 하지만 온도가 970K에서 1070K로 높아질수록 그 차이는 감소하였다. 그러나 화염 수명시간(life time)은 바이오 디젤의 함량이 증가할수록 화염 수명시간이 길게 나타났다. 이것을 통하여 경유의 연소속도가 바이오 디젤의 연소보다 더 빠르다는 것을 알 수 있다. 또 전연소기간을 비교 하면 액적 지름이 큰 경우 경유와 바이오 디젤의 큰 점화지연 차이에도 불구하고 전연소기간의 차이는 작게 나타났다. 이것 또한 두 연료간의 연소 속도 차이 때문이다. 하지만 합 산소 연료인 바이오 디젤에 비해 경유에서 더 많은 매연이 발생 되었다. 이것은 고속비디오 카메라를 이용하여 확인 할 수 있었다.

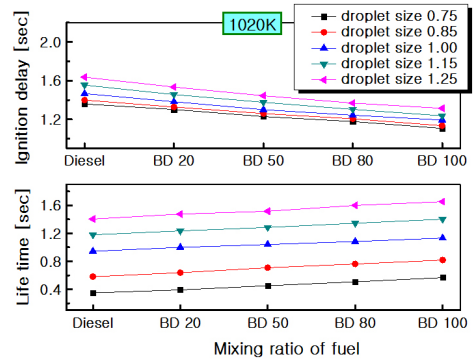
Fig. 6은 바이오 디젤의 함량에 따른 연소과정과 미소 폭발(ME ; Micro-explosion)을 보여주고 있다. 카메라 촬영 속도는 250f/s로 하였다. 전기로의 슈트가 열리고 액적이 전기로 벽층 상부와 일직선이 되는 순간부터 촬영되기 시작한 것이다. 그리고 이것을 통하여 점화지연, 화염 수명시간 등을 계산 하였다. 연소 과정 사진을 비교 하였을 때, BD 100일 경우에는 미소폭발이 발생하지 않았다. 하지만 경유에서는 미소폭발이 발생하였다. 미소폭발은 액적이 가열되면서 액적속의 서로 다른 비등점을 가진 혼합물이 증발이 억제되어 과열상태에 이르게 되고

어느 시점에서 연료의 억제력이 파괴되어 폭발을 일으키는 현상을 말한다. 이것으로 경유가 여러 가지 혼합물로 구성되어 있다는 것을 알 수 있었다.

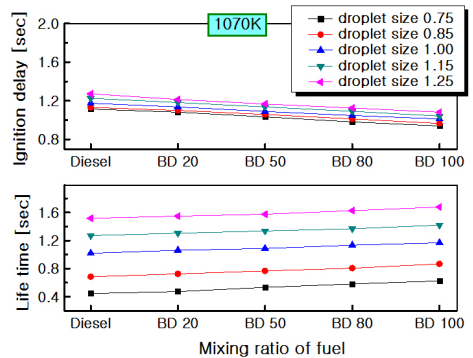
한편 바이오 디젤의 함량이 증가 할수록 미소폭발이 빠르게 나타났다. 이것은 바이오 디젤의 함량이 늘어날수록 점화지연 시간이 짧아져 액적 가열 시간이 빨라지



(a) Ambient temperature 970K



(b) Ambient temperature 1020K



(c) Ambient temperature 1070K

Fig. 5. Effect of droplet size and ambient temperature and mixing ratio of fuel on ignition delay and life time.

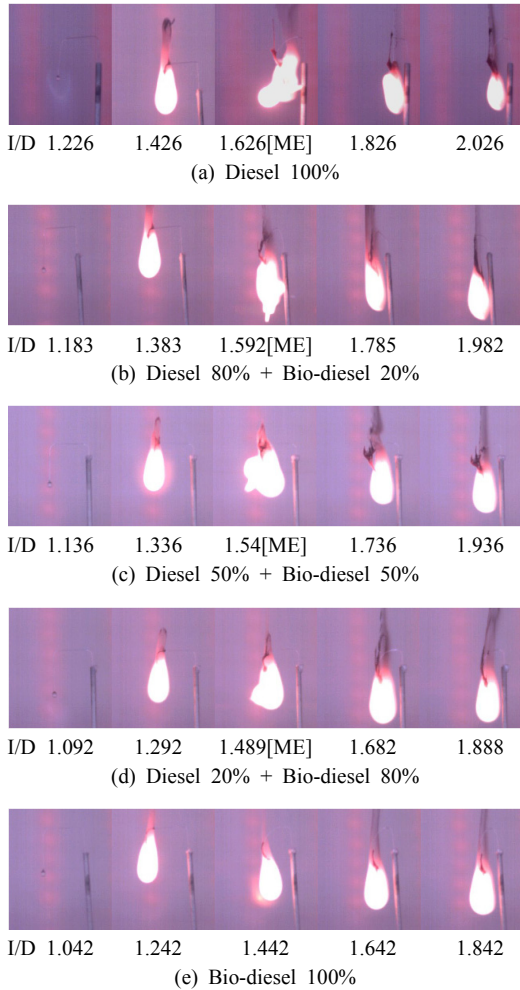


Fig. 6. Direct photographs of combustion behavior for droplets ($D=1.15\text{mm}$, $T_a=1070\text{K}$)

기 때문이다. 또 미소 폭발이 발생하였을 때, 화염 수명 시간이 짧아지고 결국 전연소시간이 감소하게 된다. 한편 매연의 발생량의 경우에 미소폭발 시 매연이 감소하게 된다. 이것은 미소폭발 발생 시 액적이 체적이 팽창되고 화염 크기가 커지게 된다. 그 결과 공기와 화염이 접촉하는 면적이 넓어져 충분한 산소가 공급되기 때문이다.

3-3. 액적 크기에 따른 연소 특성

액적의 크기는 점화지연과 화염 수명시간에 큰 영향을 미치게 된다. Fig. 7은 액적 크기에 따른 점화지연과 화염 수명시간을 나타내었다. 그래프에서 보는 것과 같이 액적의 크기가 증가함에 따라 점화지연, 수명시간이 증

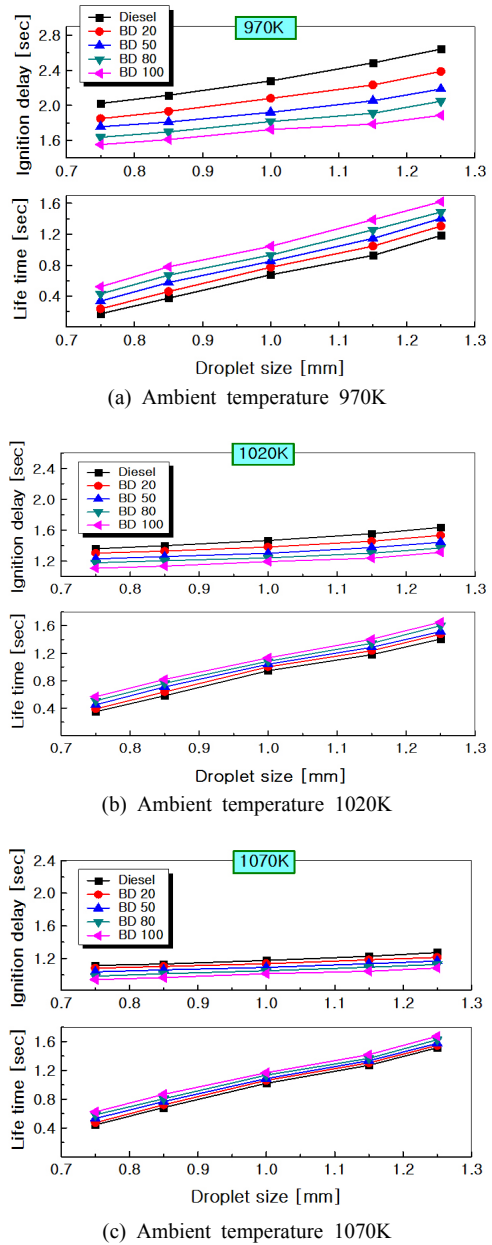


Fig. 7. Effect of droplet size and ambient temperature and fuel property on ignition delay and life time

가하는 것을 알 수 있다. 특히 액적이 큰 경우의 점화지연의 차이가 크게 나타났다. 이것은 액적의 크기가 커짐에 따라 더 많은 양의 열 흡수를 필요하므로 점화지연이 증가하게 된다.

Fig. 8은 주위 온도 변화, 액적 크기와 바이오 디젤 함

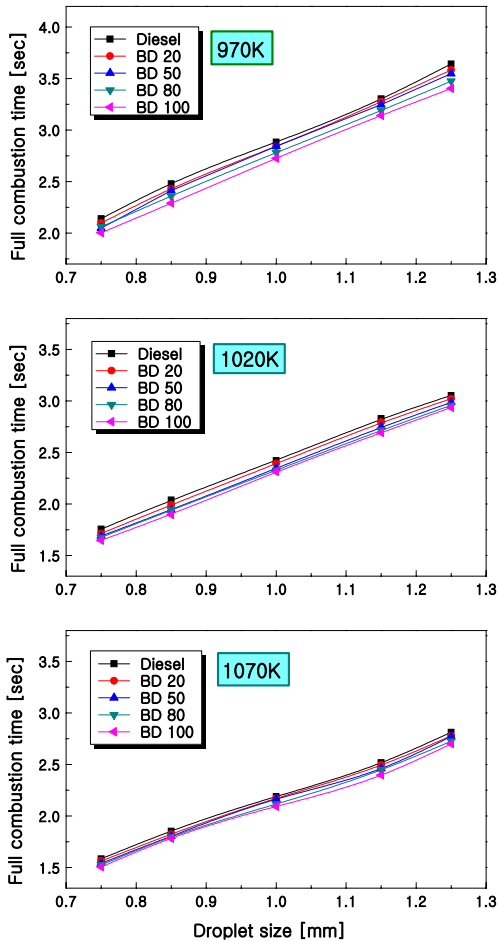


Fig. 8. Effect of droplet size and ambient temperature and fuel property on full combustion time

유량에 따른 전연소시간을 나타내었다. 전연소시간은 점화지연과 화염 수명시간을 더한 것이다. 액적의 크기 증가함에 따라 전 연소 시간이 증가됨을 알 수 있었다. 그러나 낮은 온도에서 액적이 큰 경우 큰 점화지연의 차이에도 불구하고 비슷한 전연소시간의 차이가 비슷하게 표시되었다. 이것은 연료의 연소 속도와 크게 관련이 있다.

매연 발생량의 경우에도 액적이 클수록 매연 양이 증가 되었다. 미소폭발의 경우에는 액적이 커짐에 따라 미소폭발의 발생 빈도도 증가 되었다. 액적이 작은 경우 ($D=0.75\text{mm}$)에는 연소 시간이 짧아서 미소폭발을 확인 할 수 없었다. 특히 액적 지름 1.0mm 일 때 미소폭발이 자주 발생 되었다.

4. 결 론

경유와 바이오 디젤을 단일 액적으로 주변온도와 액적 크기를 변화하여 가면서 Diesel, BD 20, BD 50, BD 80, BD 100의 비율로 혼합연료를 만들어 연소실에서 연소시킬 때 나타는 점화지연, 수명시간, 전연소시간, 미소폭발에 대한 특성을 파악하였다.

- 1) 경유와 바이오 디젤 액적의 점화지연을 비교 하였을 때, 바이오 디젤의 액적이 점화 지연이 짧았다. 주위 온도가 상승함에 따라 그 차이는 줄었다. 그리고 액적의 크기가 커질수록 점화지연이 증가되었다.
- 2) 경유보다 바이오 디젤이 더 낮은 온도에서 자발화(auto ignition) 하였다. 그리고 바이오 디젤의 함량이 증가함에 따라 점화지연은 감소되었다. 이로 인하여 바이오 디젤의 함량이 많을수록 미소폭발이 빠르게 일어났다.
- 3) 미소폭발은 바이오 디젤에서 발생하지 않고, 경유에서는 경유의 함량이 증가할수록 미소폭발이 더 자주 발생되는 것을 알 수 있었다. 미소폭발 발생 시 전연소시간 짧아졌다. 이로 인해 점화지연이 긴 경유의 전연소시간과 바이오 디젤의 전연소시간을 비교 하였을 때 차이는 작게 나타났다.
- 4) 액적이 작은 경우($D=0.75\text{mm}$)일 경우에는 미소폭발이 발생하지 않았다. 하지만 액적의 크기가 커짐에 따라 미소폭발 발생 시간이 지연되고 미소폭발 정도가 강해지고 매연의 발생량이 증가되는 것을 확인할 수 있었다.
- 5) 함 산소 연료인 바이오 디젤과 경유의 매연 발생량을 비교 하였을 때, 경유의 매연 발생량이 더 많은 것을 확인할 수 있었다. 그리고 액적의 크기가 커질수록 매연 발생량이 증가 되었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 교육인적자원부의 지방대학혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

1. 임재근, 최순열, 2008, 직접분사식 디젤기관에서 연료소비율 및 배기 배출물 특성에 미치는 바이오디젤유의 영향, 해양환경안전학회 제14권, 제1호, p83-87.
2. 정인철, 이경환, 2007, 단일유화액적의 분위기 온도와 액적크기에 따른 자발화와 미소폭발에 대한 영향, 한국자동차

- 차공학회 논문집, 제15권 제1호, pp. 49-55.
3. C. K. Law, C. H. Lee and N. Spinivasan, "Combustion Characteristics of Water-in-Oil Emulsion in Diesel Engines," *Combustion Science and Technology*, Vol.18, No.5, p.217-221, 1978
 4. I. C. Jeong and K. H. Lee, "Auto-ignition and Micro-explosion Behaviors of Droplet Arrays of Water-in-fuel Emulsion", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 9, No. 6, p.735-740.
 5. T. Tsukamoto and T. Niioka, "Dynamics of Heterogenous Combustion and Reacting System." *Progress in Aeronautics and Astonautics, AIAA*, Vol.152, p263. 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.