

유화단일액적의 연소에 관한 소음 특성 연구

조성철 · 오양환* · 임석연†

국제대학교 자동차기계계열

*국제대학교 보건관리과

†동명대학교 자동차공학과

(2014년 8월 25일 접수; 2014년 9월 15일 수정; 2014년 9월 17일 채택)

An Experimental Study on the Sound Level Intensity Characteristics for Combustion of Single Droplet Emulsified Fuels

Seong-Cheol Cho · Yang-Hwan Oh* · Seok-Yeon Im†

Dept. of Division of Automotive & Mechanical Engineering,

Kookje College, Kyonggi-do 459-070, Korea

**Dept. of Health Administration, Kookje College, Kyonggi-do 459-070, Korea*

†Department of Automotive Engineering, TongMyong University, Busan 608-711, Korea

(Received August 25, 2014; Revised September 15, 2014; Accepted September 17, 2014)

Abstract : The objectives of this study was to examine experimentally the microexplosion phenomena of single droplet W/O(water-in-oil) type emulsified fuel. Also, measured the combustion characteristics of single droplet emulsified fuel for microexplosion phenomena in atmospheric pressure condition.

The larger quantity of adding water makes microexplosion phenomenon with higher intensity of sound level, because larger water droplet has better coalescence for emulsified fuel. The small quantity of adding water makes puffing with lower sound level intensity. In latter period of extinction, large size droplet of the emulsified fuel breaks down rapidly to small size droplet, and microexplosion phenomenon occurs with multi step combustion.

Keywords : Single droplet emulsified fuel, Sound level intensity, Microexplosion phenomena, Multi step combustion

†Corresponding author
(E-mail: imsy@tu.ac.kr)

1. 서론

일반적으로 탄화수소계열 연료에 물을 혼합한 유화연료의 연소에서는 연료의 증발, 연소와 더불어 물의 증발이 일어나기 때문에 2차적인 미립화 현상인 미세폭발(microexplosion)현상이나 소파열(puffing)현상이 나타난다. 물의 급격한 증발에 의한 유적의 2차 미립화 현상인 미세폭발현상은 연료액적에서 먼저 증발이 발생하고, 분열, 폭발(explosion)로 전개된다. 이러한 현상은 연소효율을 극대화시켜 엔진효율을 향상시킬 뿐만 아니라 분무 관통력의 증가에 따른 주위공기 혼입량 증대 등의 장점이 있다. 따라서 열효율을 거의 저하시키지 않고 그을음과 미연탄화수소 등의 유해가스 배출을 저감시킬 수 있으며, 수증기에 의한 연소 온도의 저하로 질소산화물도 저감시킬 수 있다[1, 2, 3, 4]. 그러나 유화연료를 장기간 보관 시 상분리 현상으로 인한 연료의 안정성 문제가 발생하는데, 유화연료의 기계적 혼합시설과 현 주유소와 같은 연료저장 공급시설의 구비가 어려운 단점이 있다[5, 6]. 하지만 일부의 보일러와 디젤기관 등에서 실용화되고 있다.

액적의 연소는 가열, 증발, 점화 및 연소의 4단계로 구분할 수 있으며, 이러한 일련의 연소과정을 규명함으로써 연료가 사용되어지는 연소시스템의 정량적인 해석이 가능하다[7]. 액적연소의 응용은 연소실 설계, 자동차 및 항공기 엔진, 연소기기 개발 등 거의 모든 연소시스템에 걸쳐 활용의 폭이 넓으며, 연소관련 시스템의 기초연구의 일익을 담당하는 분야로서 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 한편으로는 에너지 절감 측면에서의 연소효율의 증가뿐만 아니라 불안전 연소 등에 의한 환경오염의 저감을 위해서도 액적연소에 관한 연구가 적용되고 있다[8].

본 연구에서는 유화단일액적의 연소특성에 관한 실험적 연구의 1단계로서 W/O형 유화연료를 제조한 후 액적을 연소시키고, 이때 나타나는 소음을 중심으로 미세폭발 현상과 유화단일액적의 연소특성을 분석 하였다[9].

2. 실험장치 및 방법

2.1. 유화연료 제조장치

본 실험에 사용된 시료는 비중이 0.82인 경유와 증류수를 각각 5, 10, 15, 20, 25 및 30 %비율의

중량비로 혼합한 6개를 사용하여 유증수적형(W/O형) 유화연료를 제조하였다.

또한 비 이온성 계면활성제는 2가지를 사용하였는데 각각 혼합비율은 경유의 중량비로 1, 2 및 3 %를 사용하였다. 계면활성제의 HLB가는 3.5~6이 타당하기 때문에 본 실험에 사용된 계면활성제는 HLB가 4.3인 Span80의 90 %와 10 %의 Tween 80(HLB가 15)을 (1)식을 이용하여 HLB가 5.4인 계면활성제를 각각 제조하였다[10, 11].

$$\frac{(W_A \times HLB_A) + (W_B \times HLB_B)}{W_A + W_B} \quad (1)$$

여기서 W_A 및 W_B 는 각각 Span80(HLB가 4.3)과 Tween 80(HLB가 15)의 첨가중량이다[12, 13, 14].

유화연료 혼합에는 최대 회전속도 10,000 rpm인 Ross사의 Homomixer를 이용하여 5분 동안 교반하여 균질한 유화연료를 제조하였다.

2.2 유화단일액적 측정장치

2.2.1 유화단일액적 공급장치

유화단일액적의 연소 실험장치 시스템을 Fig. 1에 나타냈다. 구성은 microsyringe, step motor, rotational profile의 유화연료 단일액적 공급부와 K-type thermocouple, sound level meter의 측정부 및 computer와 A/D board로 구성되는 데이터 처리장치 및 heater와 유화연료 단일액적을 연결한 quartz fiber로 구성되어 있다. 또한 소음 측정을 위해서 연소실험 장치는 흡음체를 이용하여 주위의 소음을 차폐시켰다. Photo. 1에 실험장치의 사진을 나타냈다.

유화연료를 제조한 후에 최대 공급량이 10 μ L인 Hamilton사의 microsyringe를 이용하여 흡입한 후에 step motor를 이용하여 석영선에 공급하였다.

유화단일액적 연소실험의 기본개념을 Fig. 2에 나타내었다. 유화단일액적을 석영선에 매단 후 heater를 바로 ON(켜다)한다[15, 16, 17]. heater가 가열되는 시점을 기점으로 유화연료 단일액적의 연소특성을 측정하였다. 측정이 끝나는 시점은 heater를 바로 OFF(끄다)하는 시점으로 설정하였다.

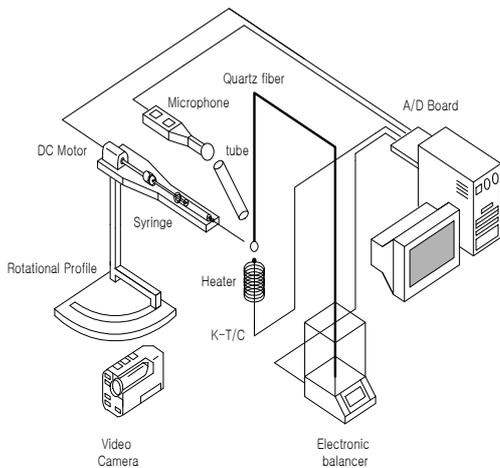


Fig. 1. Schematic diagram feeding system of a single droplet combustion.



Photo. 1. Photograph of a single droplet combustion.

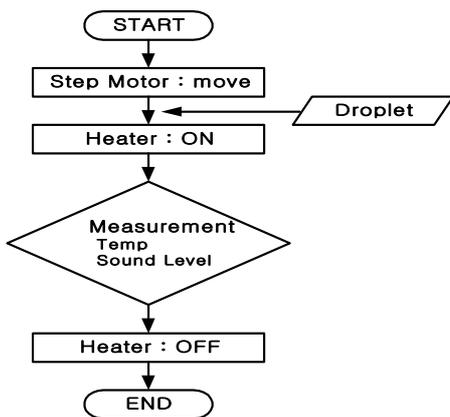


Fig. 2. The experimental process of a single droplet combustion.

현수선은 Fig. 3에 보는 것과 같이 현수선 직경은 0.3 mm이고 선단의 직경은 0.8 mm를 선정하였다. 예비실험 단계에서 선단직경을 0.5 mm, 1.3 mm를 사용하였는데 0.5 mm인 경우는 액적의 표면장력과 자중현상에 의하여 석영선에 매달리지 못하고 액적이 떨어지는 현상이 발생하였고, 1.3 mm인 경우에는 정상적인 연소현상이 발생하지 않아 본 실험에서는 0.8 mm의 석영선을 사용하였다.

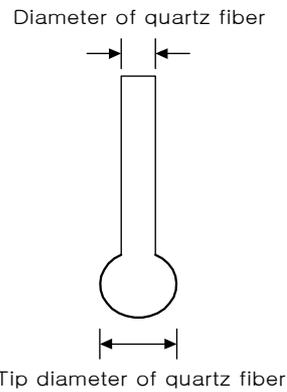


Fig. 3. Schematic diagram of quartz fiber.

유화단일액적의 공급은 step motor와 microsyringe를 이용하여 현수선에 공급하였다. step motor, microsyringe, rotational profile로 구성되어 있다. 실험에 사용된 step motor의 사양은 Table 1에 나타냈다. step motor의 1 pulse당 회전각도는 7.5° 이고 4개 pulse가 1개의 loope이므로 1 loope당 회전각도는 30° 이다. 또한 이송거리 1 mm에는 6 loope가 소요된다. 본 실험에서 공급된 유화연료는 1 μL를 기준으로 5.5 mm가 이송되고 33 loope가 필요하며 총 132 pulse가 소요된다. 회전각도로는 132pulse×7.5° 이므로 990° 가 소요된다.

Table 1. Specification of step motor

Motor Size	PM55L-048	Coil Resistance	30 [Ω]
Number of Steps per Rotation	7.5°/step	Material	Ferrite plastic magnet
Drive Method	2-2 Phase	Insulation Resistance	100M[Ω] MIN
Drive Voltage	24 [V]	Dielectric Strength	AC 500[V] 1[min]
Drive Circuit	Unipolar Const. Volt	Operating Temp.	-10℃ ~ 50℃

Photo. 2는 본 실험에 사용된 Step motor, microsyringe and rotational profile를 나타낸 사진이다.



Photo. 2. Step motor, microsyringe and rotational profile.

2.2.2 액적가열온도에 따른 소음특성 측정장치

HLB가 4.3과 5.4인 계면활성제를 각각 1, 2 및 3 %씩 혼합하여 총 54가지의 연료에 대해서 연소 현상을 측정하였다. 또한 소음의 강도를 측정하기 위하여 sound level meter(ONO SOKKI LA-215) RS-232C를 사용하였고, 측정범위는 30 ~ 80 dB를 설정하여 실험을 하였다.

액적가열온도 측정에 사용된 열전대는 보호관이 있는 K-형을 사용하였다. 열전대의 직경은 0.51 mm를 사용하였다. Fig. 4에 나타냈다.

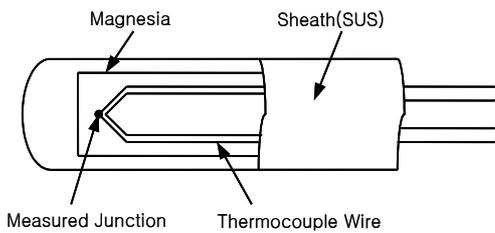


Fig. 4. Configuration of thermocouple probe. (K-type)

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 소음특성

Fig. 5는 HLB가 4.3인 계면활성제를 1%첨가하고 물의 혼합량을 10 %로 하고 액적 공급량을 2 μ L, 3 μ L, 4 μ L로 하였을 때 액적 가열온도에 대

한 소음특성을 나타냈다. 그림에서 보는 것처럼 액적 공급량이 적은 2 μ L일 때가 4 μ L보다 조기에 폭발현상이 발생했고 4 μ L를 공급하였을 때 폭발 현상이 나중에 발생하였다. 이러한 현상은 액적의 공급량이 적으면 가열되면서 액적 내부에 분포되어 있는 수적들이 조기에 비등을 시작하여 연소가 시작되기 때문으로 판단된다.

소음의 측정은 소음계의 측정범위를 30 ~ 80 dB로 설정하고 측정 하였다. 액적 공급량이 3 μ L일 때가 약 55 dB로 제일 높게 나타났다. 2 μ L 때에는 유화연료속의 수적들이 조기에 연소를 시작하지만 수적의 양이 적기 때문에 조기에 연소가 진행되고 4 μ L일 경우에는 액적이 가열되면서 자중에 의해 하부로 처짐 현상이 발생하여 정상적인 착화온도에 도달하기 전에 연소가 발생하여 소음의 크기가 3 μ L일 때보다 작게 나타났다. 결국 10 %와 같이 물의 혼합비율이 적은 경우에는 액적이 가열되면서 수적입자들이 먼저 증발 되기 때문에 소음은 나타나지만 microexplosion 현상보다는 puffing(소파열) 현상으로 관찰된다.

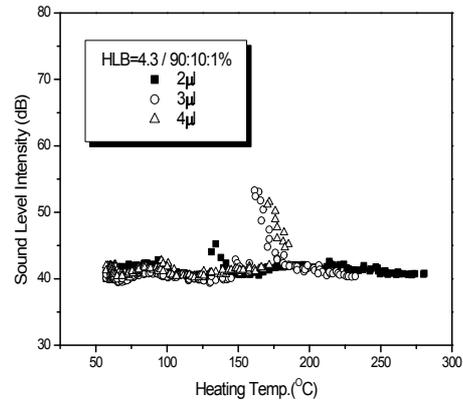


Fig. 5. Sound Level Intensity (dB) in according to heating temperature of emulsified fuel.(HLB=4.3, 90:10:1%)

Fig. 6~Fig. 8은 연소시간에 따른 소음도를 나타냈다. Fig. 6과 Fig. 7은 2 μ L, 3 μ L를 공급하였을 경우 물의 혼합량이 30 %인 경우가 약 75 dB로 가장 큰 소음특성을 나타냈다. 이러한 현상은 주로 연소과정 말기에 발생하는데 이것은 액적이 가열됨과 동시에 유화연료액적 내부에 대류가 발생하기 때문에 액적내부에 미세하게 분산되어 있

는 수적들이 응집해서, 조대 수적으로 형성되고 이것이 비점이 높은 경우보다도 빠르게 비등상태로 되기 때문에 강력한 microexplosion 현상이 발생된다고 판단된다. Fig. 8은 액적공급량이 4 μL 인 경우에 물의 혼합량을 30 %로 하였을 경우 최대 소음크기가 70dB정도로 2 μL , 3 μL 에 비해서 낮게 나타난다.

Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8에서 보는 것처럼 액적공급량이 많을수록 연소시간이 전반적으로 짧아지는 현상을 확인할 수 있었다. 2 μL 는 6초, 3 μL 는 5.7초이며 4 μL 는 4.6초 정도에서 연소가 시작된다. 이것은 앞에서 언급했듯이 액적의 질량이 커져서 가열되면서 자중에 의해 아래로 처짐이 발생하고 정상적인 착화온도에 도달하기 전에 수적들이 미리 이탈하기 때문으로 판단된다.

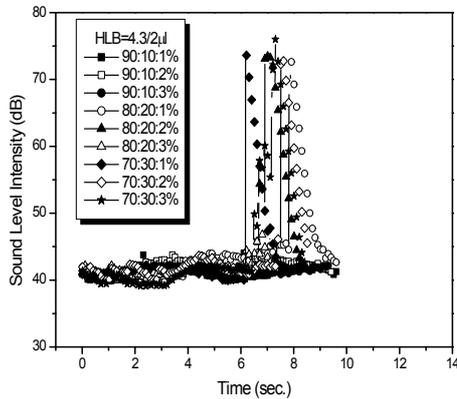


Fig. 6. Sound Level Intensity(dB) in according to combustion time of emulsified fuel.

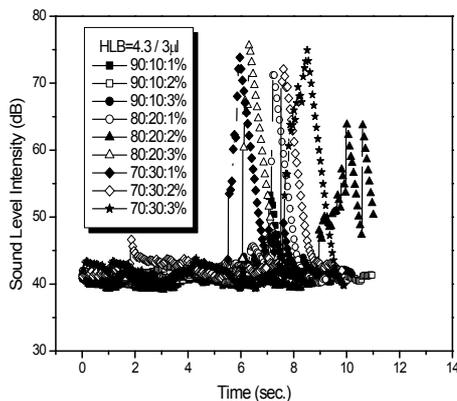


Fig. 7. Sound Level Intensity(dB) in according to combustion time of emulsified fuel.

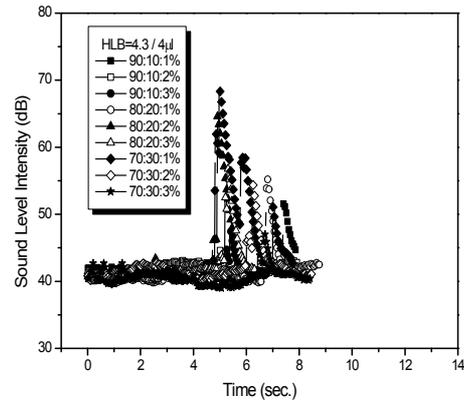


Fig. 8. Sound Level Intensity(dB) in according to combustion time of emulsified fuel.

Fig. 9, Fig. 10은 HLB가 4.3과 5.4이고 물의 혼합량을 30 %로 하였을 경우의 액적공급량 3 μL 에 대한 계면활성제의 영향을 분석하였다.

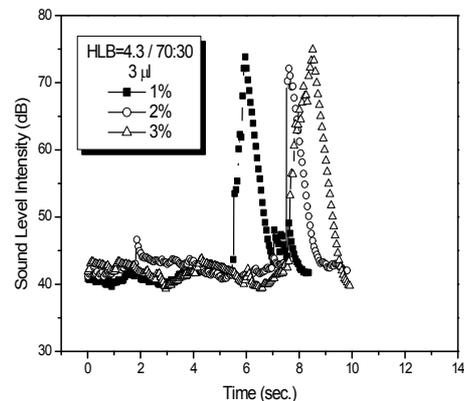


Fig. 9. Sound Level Intensity (dB) in according to combustion time of emulsified fuel.

계면활성제의 HLB가 4.3이고 물을 30 % 혼합하였을 때의 착화시간은 계면활성제가 1%조건에서는 6.206초이고 3 %조건에서는 7.1초로 계면활성제를 많이 혼합할수록 착화지연시간은 지연되었고 HLB가 5.4이고 물을 30 % 혼합하였을 때의 착화시간은 계면활성제가 1%조건에서는 9.1초이고 3 %조건에서는 11.4초로 계면활성제를 많이 혼합할수록 착화지연시간은 지연되었다. 동일조건에서 계면활성제의 양이 많을수록 착화지연시간이 지연된다. 소음의 크기는 물의 첨가량이 많기 때문에 약 75 dB정도로 큰 소음의 특성을 나타낸다. 이러한

현상은 계면활성제의 양이 많을수록 유화연료가 상태가 안정된 상태이기 때문에 판단된다.

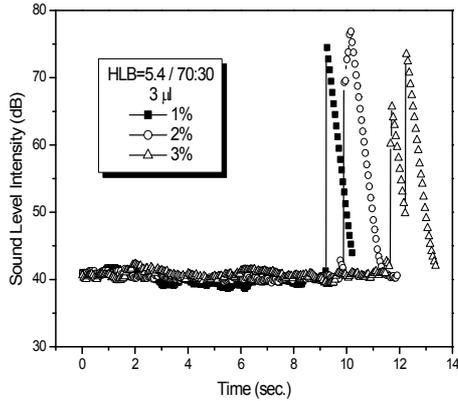


Fig. 10. Sound Level Intensity (dB) in according to combustion time of emulsified fuel.

3.2. 다단연소(Multi step combustion)현상분석

유화연료의 microexplosion 현상은 유화연료의 중요한 연소특성중 하나이다. microexplosion 현상이 발생할 때 유화연료 액적 속에 분포되어 있는 수적들이 경유가 비등하기 전에 미리 비등을 하여 유화연료 액적을 뚫고 이탈을 하기 때문에 상당히 큰 소음이 발생한다. 또한 수적이 이탈할 때 액적의 크기에도 변화가 생기는 것으로 판단된다.

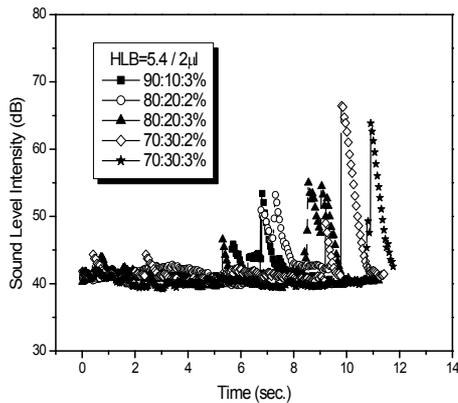


Fig. 11. Multi step Microexplosion phenomena in according to combustion time of emulsified fuel.

Fig. 11은 HLB 5.4에서 액적량 2 μL 일 때에 연소시간에 따른 소음도를 나타냈다. 그림에 나타

낸 것처럼 소음의 크기가 다단계로 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 유화연료가 연소되면서 다단계로 연소하는 과정을 나타내고 있으며 격렬한 microexplosion이 발생한 것으로 판단할 수 있다.

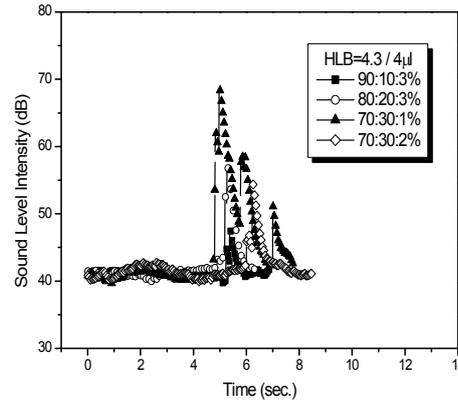


Fig. 12. Multi step Microexplosion phenomena in according to combustion time of emulsified fuel.

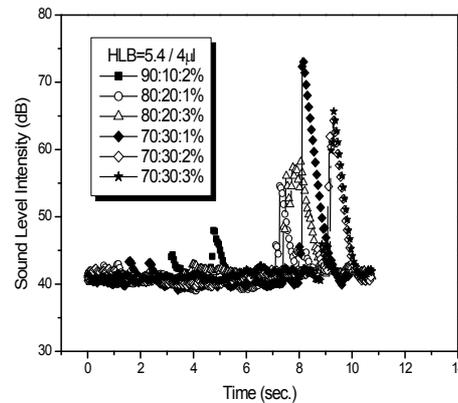


Fig. 13. Multi step Microexplosion phenomena in according to combustion time of emulsified fuel.

Fig. 12, Fig. 13은 HLB가 4.3과 5.4이고 액적공급량을 4 μL로 했을 때의 다단연소에 의한 microexplosion 현상을 소음의 크기로 나타낸 그림이다. 유화연료는 연소 후기에 액적이 분열되는 현상이 발생한다. 즉, 모 액적은 일순간에 다수의 작은 액적으로 분열되고 분열된 액적이 연소되는 다단계 연소과정이 발생하는데 이것이 다단연소과

정이다. 이러한 microexplosion 현상은 유화연료 액적내부에 분산되어 있는 작은 수적입자들이 응집해서 비교적 큰 수적입자를 형성하고, 그 입자들이 비등점이 높은 경우보다도 빠르게 비등상태로 되어 연소가 발생하기 때문에 다단연소(multi step combustion) 현상이 발생하는 것으로 판단된다. 결국 물의 첨가량이 많을수록 이러한 현상은 두드러지는 것으로 판단된다.

4. 결론

유화단일액적의 연소에 관한 소음특성에 관한 실험적 연구로 W/O형 유화연료를 제조한 후 액적을 연소시키고, 이때 나타나는 소음의 크기와 다단연소현상을 분석 하였다.

1. 물의 혼합량이 많을수록 합일현상에 의해 수적의 크기가 커져 소음의 크기가 큰 microexplosion 현상이 발생하였고 물의 혼합량이 적을 경우에는 소음의 크기가 작은 puffing 현상이 발생하였다.
2. 계면활성제의 양이 많을수록 착화지연시간이 지연되었으며 소음의 크기는 계면활성제의 양이 많을수록 유화연료가 상태가 안정된 상태이기 때문에 큰 소음의 특성을 나타냈다.
3. 유화단일액적은 연소 후기에 모 액적이 다수의 소 액적으로 분열되는 현상이 발생하여 다단연소에 의한 격렬한 microexplosion 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 물의 혼합량이 많을수록 현저하게 발생된다.

References

1. Y. Mizutani, A. Taki, "Combustion-Emission characteristics and Combustion Mechanism of Water Emulsion Spray" *Transactions of JSME(B)*, **47(424)**, 2379 (1981).
2. Y. Mizutani, A. Taki, "Combustion-Emission characteristics and Combustion Mechanism of Water Emulsion Spray" *Transactions of JSME(B)*, **47(424)**, 2386 (1981).
3. C. H. Wang, C. K. Law, "Microexplosion of Fuel Droplets under High Pressure", *Combustion and Flame* **59**, 53 (1985).
4. M. C Kim, C. S Lee, H. K. Park, "Emulsion Stability of Water/Oil Emulsified Fuel by associated with Emulsifiers", *J. of Korean Oil Chemists' Soc.*, **25(3)**, 395 (2008).
5. M. Tsue, H. Yamasaki, T. Kadota, "Microexplosion of an Emulsified Fuel Droplet under Microgravity", *Transactions of JSME(B)*, **61(587)**, 2712 (1995).
6. H. Nakagawa, "Application of Fuel Spray Theory to Exhaust Emission Control in a D.I. Diesel Engine." *SAE Trans.*, **85**, 1002 (1976).
7. K. Y. Ahn, A Study on the Ignition and Combustion of Coal-Water Slurry droplet, KAIST *PhD Thesis*, 1 (1994).
8. S. C. Cho, An Experimental Study on the Microexplosion phenomena of single droplet Emulsified Fuel, Chungnam National University *PhD Thesis*, 2 (2003).
9. Korea Institute of Energy Research, "Study on the new technology of W/O emulsion for compression ignition engine(II)", *KIER-941104*, 33(1994).
10. N. Fujita, K. Nagakura, S. Tsunokake, "The Effect of Gas Oil-Water-Methanol Emulsified Fuel on Diesel Engine Performance", *Transactions of JSME(B)*, **53(48)**, 654 (1986).
11. Y. H. Kook, J. M. Lee, S. C. Cho, S. D. Yeo, "Colloid and Surfactants", p. 105, Daekwang publish co(1995).
12. N. Sawa, S. Kajitani, "Physical properties of emulsion fuel(water/oil type) and its effect on engine performance under transient operation", *SAE paper 920198* (1992).
13. S. C. Cho, Y. H. Oh, S. Y. Im, "The measurement of capacitance of W/O type emulsified fuel using by capacitance sensor", *J. of Korean Oil Chemists' Soc.*, **24(4)**, 377 (2007).

14. S. C. Cho, Y. H. Oh, S. Y. Im, "An Estimation on the Stability of W/O Type Emulsified Fuel", *J. of Korean Oil Chemists' Soc.*, **28(1)**, 95 (2011).
15. C. K. Law, C. H. Wang, X. Liu, "Combustion and Microexplosion of Freely Falling Multicomponent Droplets", *Combustion and Flame* **59**, 175(1984).
16. L. P. Yap, L. M. Kennedy, F. L. Dryer, "Disruption and Microexplosion Combustion of Free Droplets in High Convection Enviroments", *Combustion Science and Technology*, **41**, 291(1984).
17. F. L. Dryer, "Water Addition to Practical System concepts and Applications", *16th Symposium (International) on Combustion*, 279 (1976).