

초음파 에너지로 제조된 유화연료의 수액이 분무 및 화염에 미치는 영향

Effect of Water on Continuos Spray and Flame in Emulsified Fuel made by Ultrasonic Energy

이승진*, 류정인**
Seungjin Lee*, Jeongin Ryu**

Abstract

To investigate spray and combustion of emulsified fuel of W/O type, we mixed water with light oil by using ultrasonic energy adding system. We measured the SMD of sprayed droplet to find atomization characteristics of emulsified fuel with using the Malvern 2600D system. Major parameters are the weight ratio of water(0~30% by 10%) in emulsified fuel injection pressure(10bar), and the measurement distance(10~100mm by 10mm). Combustion visualizing system is made up commonly used boiler system and digital camera 1/500s to investigate combustion phenomena.

As a result, the more water contents increased, the more SMD increased. The water particle of emulsified fuel made short flame in continous spray combustion phenomena because of micro explosion.

주요기술용어 : W/O type (유중수적형), Ultrasonic energy adding System(초음파 에너지 공급장치), Emulsified fuel (유화연료), Spray combustion(분무연소), Water particle(수액), Explosion phenomena(폭발현상),

1. 서 론

국내·외적으로 유화연료를 이용한 많은 연구가 진행되어지고 있다. 특히 유럽에서는 유화연료를 이용한 시범차를 운행하고 있다. 경유를 이용한 기관에서는 NO_x문제가 큰문제로 발생하고 있다. 일반적으로 NO_x의 대부분 발생량은 기관 내에서 연소 즉 고온, 고압 중에 질소

와 산소가 결합하는 것에 의한다. 따라서 경유를 사용한 기관의 NO_x 저감에는 연소실 내에서 발생량을 제어하는 일이 핵심이 된다.^{1,2)} 연소실의 연소를 개선하는 방법 중 하나는 유화연료 사용이다. 이는 경유에 소량의 물을 첨가한 연료로서 연소시 물이 액체연료의 기화를 촉진시켜 효율적인 연소진행을 도와주므로 기관의 성능이 향상되며 이에 따라 유해배기가스가 저하되는 장점이 있는 것으로 알려졌다.^{3,4,5)}

* 충남대학교대학원, ** 충남대학교

본 논문에서는 이러한 장점을 가진 유화연료를 실제 기관에 적용하기 위해 유화연료 제조장치와 조합하여 장치를 구성하였다.

유화연료는 미소폭발(micro-explosion)이라는 2차 미립화현상이 발생한다. 이 미소폭발은 연료 액적에서 분열, 폭발이 일어나 연소를 활성화 시키는 역할을 한다. 본 실험에서는 3가지 방법으로 수액이 분무 및 화염에 미치는 영향에 대해 실행하였다.

첫째, 연속분무 노즐을 사용하여 분무시 수액의 영향이 미립화에 어떠한 영향을 주는가에 실험을 하였다.

둘째, 용기를 이용한 연소를 통해서 수액이 연소에 미치는 현상을 관찰하였다. 연소 시 유화 연료 표면으로부터 급격히 변화하는 현상을 측정하기에는 많은 어려움이 있어 보다 긴 시간을 가지고 관찰하기 위해서 bowl을 이용하는 방법을 수행하였다.

셋째, 연속분무 노즐을 이용하여 분무 화염에 수액이 어떠한 영향을 미치는가를 관찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 유화연료 및 제조장치

유화연료는 균일하게 용해되지 않은 두가지 유체가 다른 액체 중에 분산되어 있는 형태로 분산입자의 크기는 대략 10~5000Å 정도 된다.

유화연료는 크게 두 가지 형태로 분류할 수 있는데 기름 입자속에 물 입자가 분포되어 있는 유중수적형(W/O, water in oil)과 물 입자속에 기름 입자가 분포되어 있는 수중유적형(O/W, oil in water)이 있다. 일반적으로 전자는 공업용 연료로 사용이 되고 있기 때문에 전자를 사용하였다.⁵⁾

본 실험에 사용된 유화연료는 Fig. 1과 같이 기계식 교반과 초음파 에너지를 이용한 연료공급장치를 병용하여 사용하였다.

이 장치는 유화제를 사용하지 않고 짧은 시간에 유화연료를 제조하는 초음파 에너지 공급장치이다.

유화연료 공급장치부에서 유화연료는 초음파의 진폭이 최대인 진폭확대자의 선단부분에서 경유와 물의 진동에 의해 생성된다. 유화연료는

가스흡입장치와 펌프를 지나 노즐을 통해 분사된다. 경유와 물을 탱크에 중량비를 0-30%까지 10% 간격으로 증가시켰고, 초음파 진동자가 장착된 초음파 에너지 부가 장치로 일정하게 유입되어 유화연료가 제조된다. 이때 일정하게 유입되도록 하기 위해서 교반기를 설치하였다. 또한 초음파 유화연료제조장치 다음에는 펌프가 정속운전을 할 수 있도록 하기 위하여 가스배출장치를 장착하였는데, 이 가스배출장치는 초음파에 의해 발생된 기포를 대기로 뽑아내는 장치이다.

이때 사용된 초음파 유화연료장치는 볼트 체결형 진동자(B.L.T)와 혼 그리고 초음파 발생장치로 구성되어 있으며 이를 Fig. 2에 나타내었다. 초음파의 주파수는 28kHz인데 이 초음파 혼과 BLT가 초음파를 발생할 수 있는 최적의 조건이다. 또한 제작하기 쉬운 계단형(step type)혼을 사용하였고 재질은 알루미늄계열의 Al 7017-T6이다.

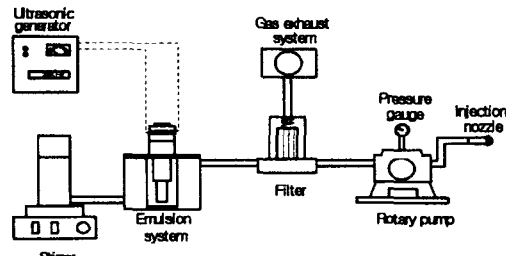


Fig. 1 Schematic diagram of emulsified fuel feeding system

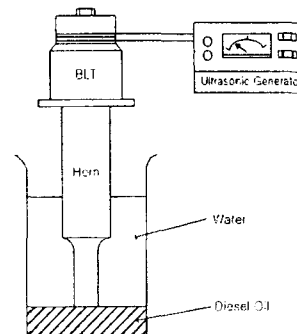


Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic system

2.2 분무입경 측정장치

연료의 분사펌프는 로터리 방식의 펌프를 사용하였으며, 연료분사노즐은 압력식 단공 노즐로서 분무각은 60°이고, 분무는 hollow-corn 형태이며, 분사유량은 10bar를 기준으로 하여 시간당 0.85gallon의 상용노즐을 사용하였다. Fig. 3에 실험에서 사용한 노즐의 구조를 나타내었다.

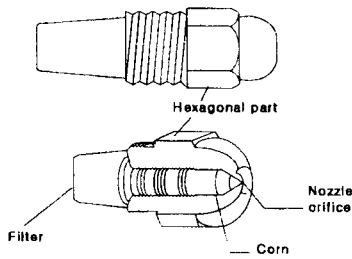


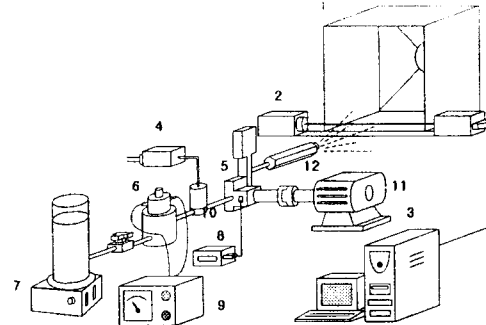
Fig. 3 Nozzle shape

분무입경 측정에 사용된 전체적인 시스템의 구성도는 Fig. 4와 같으며, 구성은 크게 분무입경 광학측정장치와 유화연료 공급장치부로 되어 있다.

광학측정장치는 분무입경을 측정하기 위하여 Fraunhofer 회절원리를 이용한 Malvern system 2600D를 이용하였다.

Table. 1 Specification of particle analyzer

Model	2600D	
Manufacturer	Malvern instrument, England	
Size range	0.5~564 microns 3 ranges standard model 0.5~1880 microns 6 ranges long bed model	
Laser transmitter	2mW, He-Ne Laser(633mm wave length) with 9mm beam expander	
Receiver	Fourier transform lens	
	Focal length & Measuring size	300mm (5.8 ~ 564 μm)
Dectector	31 element solid state detector	
Accuracy	±4% on volume median diameter	



- 1. Spray chamber 2. Laser source
- 3. Computer 4. Gas exhaust system
- 5. Rotary pump 6. Emulsion chamber
- 7. Stirrer 8. Magnetic switch
- 9. Ultrasonic generator 10. Filter
- 11. Electronic motor 12. Nozzle

Fig. 4 Experimental apparatus for measuring SMD

2.3 연소 현상 측정

2.3.1 Bowl 연소 현상 측정

유화연료 내의 수액입자의 거동 및 미소폭발 현상을 관찰하기 위해서 Fig. 5와 같이 8mm video camera를 이용하여 수액입자의 폭발현상을 관찰하였다.

Bowl의 크기는 지름이 9mm, 깊이 7mm, 두께 1.3mm인 tempered glass이다.

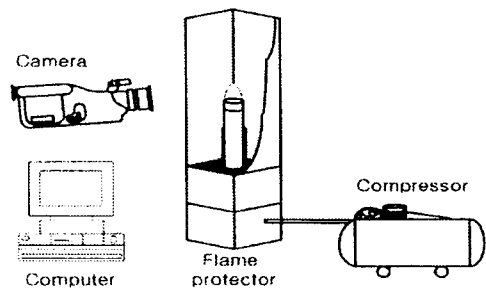


Fig. 5 Visualization of bowl combustion system

2.3.2 분무 연소 현상 측정

Fig. 6은 분무연소의 장치를 나타낸 것이다. 초음파 공급장치에 송풍기와 전기점화장치를 부착하여 장치를 제작하였다. 이때 송풍기의 송풍량은 일정하게 (18m³/hour)로 유지하였고, 화

염방향은 수평방향으로 향하게 하였다. 물의 함량이 0%, 10%, 20%, 30%일 경우의 연소 현상을 디지털 카메라를 사용하여 노즐에서 연속 분무 되어 연소되는 과정을 가시화하였다. 연소실은 대기에 노출시킨 상태에서 실험을 하였고, 이때 외기가 큰 영향을 주지 않기 위해 외벽을 설치하였다.

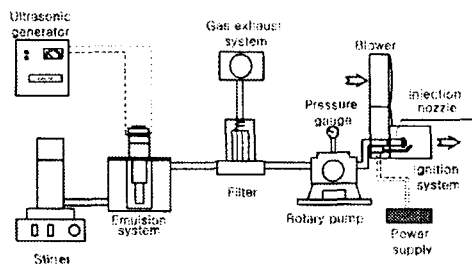


Fig. 6 Schematic diagram of spray combustion system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무입경 분포

액체의 분무에서 기체 주위에 집단적으로 존재하는 액적은 다양한 크기의 분포를 가지고 있다. 표본으로 추출된 액적들을 수학적인 분포 함수로 계산하여 액적의 분포도를 구할 수 있다. 여기서 사용한 분포함수는 Rosin - Rammuler 분포함수이다. 액적 체적의 누적분율 R을 입경 D에 대해서 표시하며, 이분포함수의 형태는 다음 식과 같다.

$$R = \exp\left[-\left(\frac{D}{X}\right)^\delta\right] \quad (1)$$

여기서 X와 δ 는 입경 분포 변수를 의미한다. δ 는 입경분포의 분산도와 관계되는데, 큰 δ 의 경우에는 더 균일한 분포를 가지며, 만일 아주 커지면 모든 액적은 같은 직경을 갖는 것을 의미한다. 다른 분포변수 X는 평균 입경과 관련되며 X가 커지는 경우에는 평균 입경이 커지는 것을 의미한다. 이 분포함수의 장점은 측정이 어려운 작은 액적들을 잘 측정할 수 있다는 점이다.

Fig. 7은 수분함량에 따른 입경분포도이다. 거리가 100mm일 경우 경유와 비교하면 함수량이 10%, 20%, 30%일 때 SMD가 각각 5%,

47%, 54%씩 증가하였다. 이는 수액의 영향으로 점도가 높아 미립화에 좋지 않은 영향을 주는 것으로 생각된다.

Fig. 8은 유화연료의 함수량에 따른 거리별 분포를 나타낸 것이다. 분무선단으로부터 거리가 증가할수록 분무입경이 증가되는 경향을 보이고 있다. 경유의 경우 측정위치가 10~100mm까지 변화함에 따라 분무입경이 22 μ m~41 μ m로 증가하였다. 또한 함수량이 30%인 경우는 25 μ m~55 μ m 평균 25%의 입경이 증가함을 보였다. 여기서 거리가 증가함에 따라 분무입경이 증가함을 보이고 있는데 이는 분무액적이 합체되고 작은 입자들은 증발된 것으로 생각된다. Fig. 9는 경유의 분무현상을 나타낸 그림이다. 유화연료내의 함수량이 0%인 순수 경유에는 입경이 40~60 μ m인 액적들이 비교적 다양하게 분포하고 있었다. 또한 입경이 10 μ m인 분무액적부터 115 μ m인 액적들까지 균일한 액적 분포상태를 나타내었다.

Fig. 10은 함수량이 10%일 경우의 그림이다. 유화연료내의 함수량이 10%일 때는 40~60 μ m인 액적들이 순수경유의 경우 보다 많이 편재되어있으며 입경분포 범위 또한 100 μ m이상의 입경은 거의 분포하지 않았다.

이러한 현상은 분무선단으로부터의 거리가 멀어질수록 두드러짐을 알 수 있는데, 이러한 현상은 유화연료 내에서 비교적 입경이 큰 수액의 발생과 선단으로부터의 거리가 멀어질수록 미세 액적들 간의 결합에 의한 영향으로 사료된다.

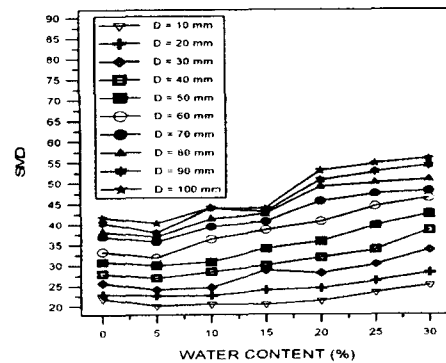


Fig. 7 SMD vs. volume of the analyzer beam

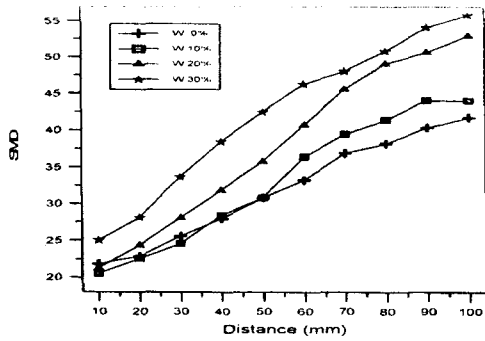


Fig. 8 SMD vs. the distance from content in emulsified fuel

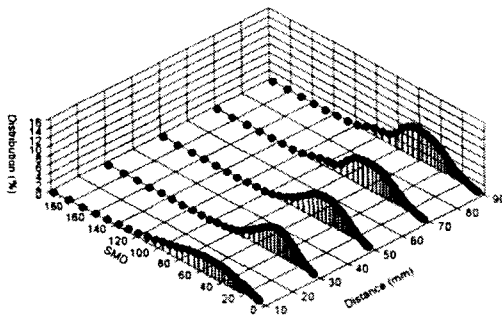


Fig. 9 SMD distribution (W/O=0%)

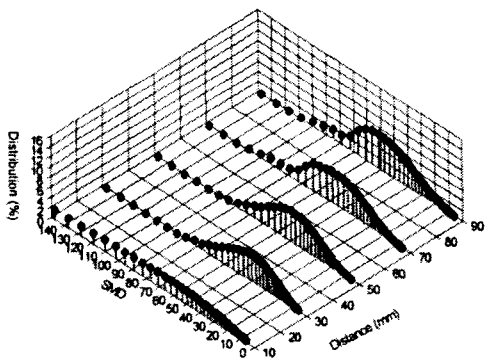


Fig. 10 SMD distribution (W/O=10%)

3.2 연소특성

3.2.1 Bowl 연소특성

유화연료의 액면연소시의 과정을 Fig. 11에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 액면연소 과정은 다음과 같이 설명할 수 있다.

- (1) 최초로 확산 화염면이 형성되고 이때 뚜렷한 경유층이 발생하기 시작한다.
- (2) 작은 미소폭발이 발생한다.
- (3) 연속적인 미소폭발이 일어난다.
- (4) 두꺼운 경유층이 발생하고 미소 폭발이 거의 일어나지 않는다.
- (5) 열에너지가 축적된 후 큰 소음과 화염을 내면서 화염이 약화되고 화염이 사라진다. 특히, 물의 함량이 많은 경우는 큰 폭발이 일어난다.

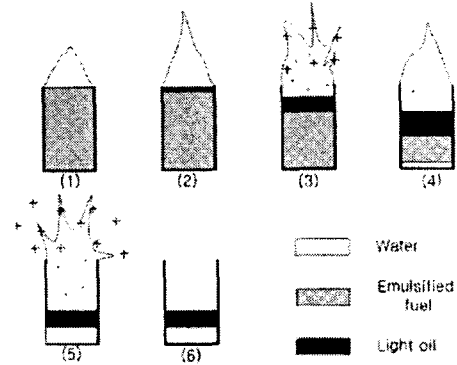


Fig. 11 Process of bowl combustion

Fig. 12에서는 경유의 용기연소과정을 가시화한 것으로 점화부터 종료까지를 나타내었다. 연소 종료 때까지의 시간이 330sec이고, 화염의 모양이 일정하게 변화되는 현상을 볼 수 있다. 초기 점화 후 비슷한 화염형태를 가진 후 서서히 작아지는 현상을 보이고 있다. 미소폭발은 두개의 서로 다른 비점의 액체가 연소되는 과정에서 발생을 하는데, 이때 미소폭발이 일어나지 않은 것은 단일 연료일 경우이기 때문으로 사료된다.

Fig. 13은 함수량이 10%인 경우의 현상을 나타낸 것이다. 경유와 비슷한 경향을 보이고 있지만, 98sec일 경우 미소폭발이 발생하여 화염이 갑자기 커지는 것을 볼 수 있다. 유화연료안의 수액의 영향으로 미소폭발이 일어나는데 화염의 형상을 변화시킬 수 있는 수액이 연소열에 의해 폭발한 것으로 생각된다.

Fig. 14는 함수량이 20%인 경우의 현상을 나타내었다. 최초상태에서는 물이 골고루 분포하다가 시간에 따라 변화하는 것을 볼 수 있다. 물의 함량이 20%인 경우는 화염을 변화시키지

많은 작은 폭발 현상이 발생하고, 50sec일 경우 화염이 커지고 후에 연소가 종료에 가까운 시점에서는 강한 폭발 현상이 연속적으로 일어나는 현상을 관찰할 수 있다. 특히 130sec일 경우 미소폭발이 크게 발생하여 화염이 갑자기 커지는 것을 볼 수 있다. 140sec일 경우는 화염이 갑자기 작아졌는데 이 원인은 미소폭발 후 유화연료가 갑자기 분산되어 상대적으로 활성화된 연료의 에너지가 적어 화염이 작아진 것으로 사료된다. 145sec인 경우는 연소로 인한 열에너지가 축적되어 수액에 영향을 주어 갑자기 미소폭발 후 갑자기 화염이 커지는 것을 볼 수 있다. 150sec인 경우는 연소할 수 있는 열에너지와 화염이 사라져 화염이 소멸된 것으로 생각된다. 20%인 경우 유화연료안의 수액의 영향이 각기 다른 함수율에 비해 강한 것으로 나타났다.

Fig. 15는 최초상태에서는 물이 골고루 분포하다가 시간에 따라 변화하는 것을 볼 수 있다. 초기에는 화염을 변화시키지 않은 작은 폭발 현상이 발생하고, 12sec인 경우 화염이 커지는 강한 폭발 현상이 일어나는 현상을 관찰할 수 있다. 10%의 경우에 비해서 물의 함량이 많아 강한 폭발이 일어나고 또한 강한 폭음이 발생하면서 격렬하게 폭발이 일어났다. 즉, 유화연료 속에 함유된 물의 양과 수액입자가 상대적으로 크기 때문에 폭발이 강하게 일어나 화염 형성에 큰 변화를 주는 것으로 보인다.

이 경우는 연소시간이 짧고, 강한 미소폭발이 일어난 후에는 계속적으로 화염이 크게 형성되지 않고 작은 화염이 형성 되다가 연소를 종료하는 것을 볼 수 있다. 이는 연소시 유화연료를 bowl 밖으로 분산시켜 연소할 수 있는 열이 부족하여 연소가 일찍 종료된 것으로 사료된다. 또, Camera 화상처리 결과 초기상태에는 물이 고루 분포하다가 시간에 따라 중력과 응집, 합일로 인하여 변화하는 것을 볼 수 있다

Fig. 16은 물의 함량에 따른 화염의 life time을 나타낸 것이다. 경유를 사용한 경우는 330sec로 가장 길고 그 다음은 수분 함량에 따라 점점 짧아지는 것을 볼 수가 있다.

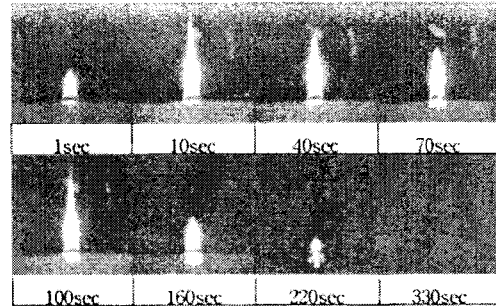


Fig. 12 bowl combustion (W/O=0%)

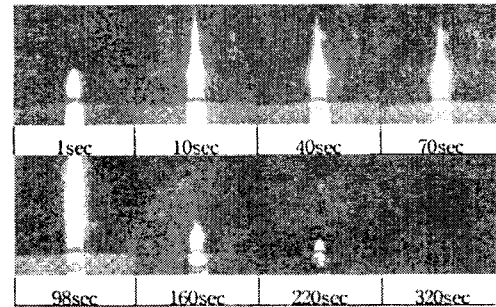


Fig. 13 Bowl combustion (W/O=10%)

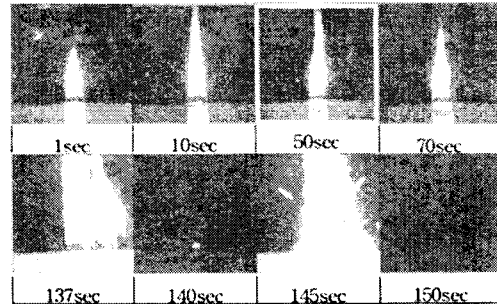


Fig. 14 Bowl combustion (W/O=20%)

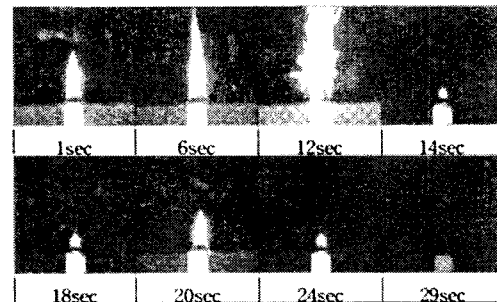


Fig. 15 Bowl combustion (W/O=30%)

특히 물의 함량이 30%인 경우는 20sec로 가장 짧게 나타나 life time이 약 90% 짧아졌다.

이러한 현상은 유화연료에 함유되어 있는 수액이 열에너지를 축적한 후 갑자기 증발하여 연료를 분산시키는 역할을 하는 것으로 사료된다.

경유인 경우는 폭발로 인한 연료의 분산 현상이 일어나지 않기 때문에 다른 조건에 비해 장시간 연소한 것으로 생각된다. 유화연료의 경우 물의 함량이 많을수록 강한 폭발현상 때문에 연료를 분산시킴으로써 화염에 영향을 주었다.

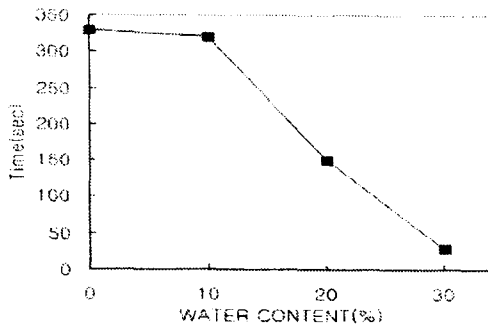


Fig. 16 Flame life time

3.2 분무연소의 특성

Fig. 17은 10bar로 고정한 상태에서 각 함수율에 대한 화염의 가시화 사진이다. 이때 물의 함량이 0%, 10%, 20%, 30%일 경우이며 각 조건별 연소 현상을 가시화 하였다.

보일러에서 분무되는 액적들에 대하여 전자식 스파크를 주어 화염을 형성하였다.

0%인 경우는 화염의 길이가 길고, 물의 함량이 증가할수록 화염의 길이가 짧아지는 것을 볼 수 있다. 이 원인은 유화연료의 2차 미립화에 의해 화염 형성 후 수액이 과쇄 하면서 일어나는 현상으로 생각 된다. 또한 함수율이 높아지면 단위체적당 에너지가 감소하게 되어 연료가 연소할 때 연료안에 함유된 수액들이 연소하는 에너지를 빼앗은 것으로 생각된다.

함수량이 많을수록 불균일한 분무가 이루어지고 경유속에 들어 있는 물의 액적이 미소폭발을 함으로써 화염의 안정성을 저하시켰다.

Fig. 18은 물의 함량에 따른 화염의 길이인 그래프로 나타낸 것 이다. 물의 함량이 많을수록 화염이 짧아졌다. 경유일 때는 82cm의 길이를 나타냈지만 물함량이 10%인 경우는 30cm의 길이를 나타냈고, 30%인 경우는 9cm의 화염길이를 나타내어 약 90%의 길이가 저감되었다. 이는 수분함량이 많을수록 수액의 영향으로 인해 연료가 연소할 수 있는 에너지를 빼앗아 짧아진 것으로 사료된다.

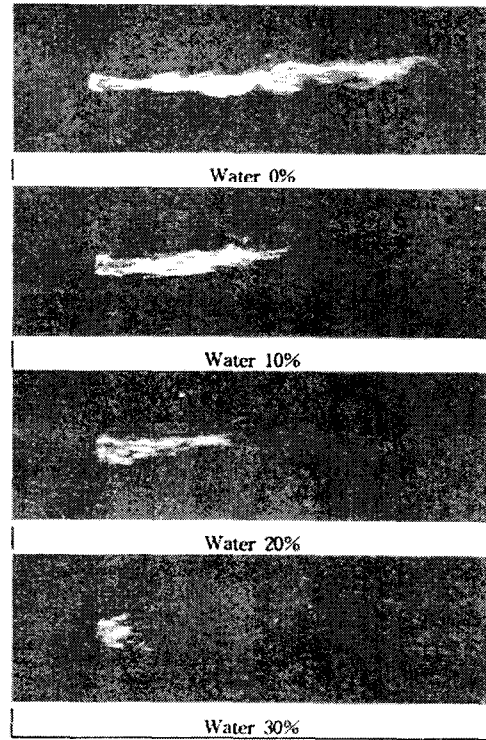


Fig. 17 Shape of spray combustion

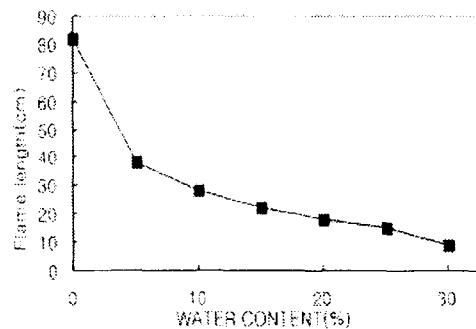


Fig. 18 Flame length of the spray combustion

유화연료는 열기관에 적용시 2차 미립화 효과와 미소폭발에 의한 난류형성 등에 좋은 효과를 볼 수 있지만, 연소의 지연과 물의 증발잠열에 의한 열손실 등의 단점도 있는 것으로 사료된다. 실제 열기관에서는 유화연료를 사용 시 유화연료특성을 고려하여 연소실을 설계 제작하여야 할 것으로 생각된다. 특히 유화연료를 사용하는 보일러는 유화연료의 분무특성과 연소특성을 참고하여 최적화된 연소실 설계가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 유화연료의 수액이 미립화 측면에서 분무와 연소에 미치는 영향에 대하여 실험하였다. 유화연료가 연료로서의 타당성을 밝히고자 초음파에너지 부가에 의해 제조된 유화연료 내의 함유량에 따른 분무입경과 연소현상에 대하여 조사, 비교하였다. 그리고 이에 따른 연소현상의 변화를 함께 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유화연료 내의 함유량을 0%-30%까지 증가시키면서 축방향 거리에 따른 분무입경을 측정할 결과, 분무입경이 증가하였다. 특히 함유량이 30%인 경우 경유대비 25% 입경증가를 보였다.
2. Bowl을 사용하여 연소한 결과 수분의 함유량이 많을수록 life time이 짧아졌다. 화염 life time이 물의 함유량이 30%일 경우는 29sec로 가장 짧게 나타났다.
또한, 연소시 연소열에 의해 유화연료의 물과 오일이 분리되는 현상이 일어났다.
3. 분무연소시 물의 함유량이 많을수록 분무연소의 화염 길이가 짧아졌다. 특히 함유량이 30%인 경우, 경유대비 화염길이가 약 90% 짧아졌다.

유화연료의 분무실험결과 순수 경유보다 액적이 크게 나타났고, 분무연소시 화염길어도 짧아졌으나, 실제 연소실에서 미소폭발현상으로 인한 유화연료 2차 미립화 현상으로 인한 연소특성이 주목된다.

참고문헌

1. Minoru Tsukahara and Tasufumi Yoshimoto, "Influence of Emulsified Fuel Properties on the Reduction of BSFC in a Diesel Engine", SAE No. 891841, 1989.
2. 이병오, 송용식, 류정인, "연료에 조사된 초음파 에너지가 디젤기관의 매연저감에 미치는 영향", 한국자동차학회 춘계학술대회 논문집 Vol.1, pp222-227, 2003
3. 이병오, "초음파 연료의 디젤기관 계 성능에 관한 연구", 충남대학교 대학원 박사학위논문, 2004.
4. 한국에너지 기술연구소(KIER), "압축 점화 기관용 유화연료 이용기술 개발 연구(II)", KIER-941104.
5. 한국에너지 기술연구소(KIER), "압축 점화 기관용 유화연료 이용기술 개발 연구(III)", KIER-951104.
6. 김용국, "분사노즐의 형상변화가 유화연료의 미립화에 미치는 영향", 충남대학교 대학원 기계공학과 석사학위논문, 1997.
7. B. E. Noltink and E. A. Neppiras, "Cavitation produced by ultrasonic : theoretical conditions for the onset of cavitation", Proc. Phys. Soc.64B 1032, 1951.