

디젤자동차의 저공해형 연료공급장치 개발 I (유화연료의 특성 및 분무거동)

Development of the low Emission type Fuel Feeding System for Diesel Automobile I

(Characteristics and Spray of Emulsified Fuel)

조성철*, 윤면근*, 류정인**
S. C. Cho*, M. K. Yoon*, J. I. Ryu**

ABSTRACT

To investigate characteristics and spray of emulsified fuel, we are mixed water with diesel oil using ultrasonic energy fuel feeding system. Separation ratio of emulsified fuel was shown good condition that of water content is small and longer ultrasonic energy adding time. Viscosity of emulsified fuel increased 7% with addition to water content and surface tension increased 1.6% in comparison to pure diesel oil. The SMD of emulsified fuel adding ultrasonic energy decreased with 3% in comparison to pure diesel oil. With increasing 5, 10% water content, the SMD decreased 15.6, 20.1% in comparison to pure diesel oil. The micro-explosion was investigated with 4step

주요기술용어 : emulsified fuel(유화연료), SMD(Sauter평균분무입경), micro-explosion (미소폭발), ultrasonic energy fuel feeding system(초음파연료공급장치)

1. 서 론

디젤기관은 현재 사용되고 있는 흡기관방식의 가솔린기관과는 다르게 흡입과정에서 공기만을 흡입한 후 압축과정 말기에 고온, 고압의 공기중으로 연료를 분사하여 연소시키는 방법을 채택하고 있기 때문에 연료의 미립화, 증발, 공기와 혼합등이 연소에 중요한 변수가 되고 있다.^{(1),(2)} 또한 디젤기관의 연소는 본질적으로 불균일연소이며, 예혼합연소와 확산연소가 혼합되어 이루어지는 복잡한 연소 형태이기 때문에 그 연소특성에 중요하게 영향을 미치는 연료 및 분

무특성을 파악하는 것이 중요하다.

또한 디젤기관은 가솔린기관에 비해 저질의 연료를 사용하면서도 열효율, 출력등이 높은 장점을 가지고 있으나 상대적으로 대기환경오염의 주요인으로서 여겨지고 있다. 이에 따라 디젤기관의 폐기가스 저감대책에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 그 방법으로 고압분사, 기하학적 형상을 개조하는 충돌분무, 연료의 개질방법등이 있다. 본 연구에서는 연료의 개질을 통한 방법으로서 유화연료를 이용하였다.

유화연료(Emulsified Fuel)는 경유와 물을 혼합한 연료로서 연소실내에서 연소시에 물이 가지고 있는 독특한 특성인 미소폭발(micro-explosion) 현상인 2차 미립화현상이 발생한다. 미소폭발은

* 충남대학교 대학원
** 충남대학교 기계공학과

연료중에 혼입된 물이 온도의 상승과 더불어 급격한 증발에 의해서 격렬하게 폭발하는 현상이다. 이것은 연소실의 연소온도를 저감시켜 디젤 기관에서 문제가 되고 있는 질소산화물, 입자상물질, 매연등의 유해배기가스를 저감시킴과 동시에 분무선단거리가 길고, 분무각이 작고, 분무입경이 커져서 분무연소에 있어 더 많은 공기를 혼입시킬수 있는 장점이 있다.^{(3),(4)}

기존의 유화연료에 대한 연구는 경유와 물을 혼합시킬 때 2액간의 계면장력을 저하시키는 역할을 하는 계면활성제를 첨가하는데 공해물질(유황성분 등)이나 독성물질(염소성분이나 브롬성분 등)이 배출되는 문제때문에 양이온 계면활성제나 음이온 계면활성제보다는 비이온 계면활성제의 사용이 바람직하다. 또한 계면활성제의 사용에 따른 배기배출물의 악화염려와 경제성의 문제로 인하여 계면활성제를 혼합하지 않는 초음파에너지를 이용하는 것이 더 타당하다 생각된다.

본 연구에서는 초음파 에너지 공급장치를 이용하여 경유와 물의 계면에 초음파 에너지를 이용하여 유화연료를 제조한 후 물리적, 화학적 방법을 통하여 연료로서의 특성을 확인한 후 분무입경을 측정하고 유화연료의 독특한 현상인 미소폭발현상을 관찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 유화연료 및 제조장치

유화연료는 균일하게 용해되지 않은 두가지 유체가운데 하나가 분산질이라고 하는 미립자형태로 분산매라고 하는 다른액체 중에 분산되어 있는 형태의 연료를 말하며 분산입자의 크기는 대략 10~ 5000Å 정도 된다. 일반적으로 분산질은 물 또는 수용액(단순히 물이라 칭함)을 가르키고 분산매는 물과 완전히 용해되지 않은 유기액체 또는 그 용액으로서 통상 기름이라 부르는 것이다. 기름이 분산질인 경우에는 수중유적형(oil in water type, O/W)에 밀전이라 부르며, 반대의 경우에는 유중수적형(water in oil type, W/O)에 밀전이라 부른다.⁽⁵⁾

본 실험에 사용된 유화연료는 기계식 교반방

법이 아닌 초음파연료공급장치를 이용하여⁽⁶⁾ 경유와 물을 전자저울을 이용해서 무게비로 계량한 후 Fig. 1과 같이 개방상태에서 초음파 혼의 선단부분을 계면에 접촉시킨 후 혼합하였다.

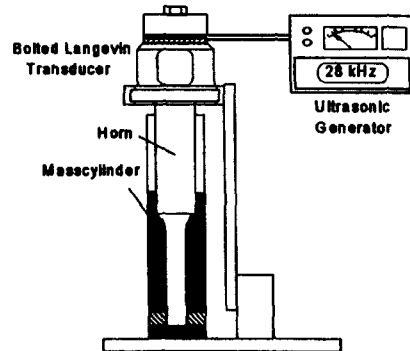


Fig.1 Schematic Diagram of the Emulsified Fuel Mixing

실험용 유화연료는 순수경유, 초음파에너지를 조사한 경유, 물의 함량을 5%, 10% 혼합한 경우와 이에 1, 2%씩 계면활성제를 혼합한 유화연료를 제조한 후에 각각의 특성을 비교하였다. 계면활성제는 H.L.B값이 3.78인 것을 사용하였는데 Span85 와 Tween80의 계면활성제를 각각 85%, 15%씩 혼합하여 유용성 계면활성제를 만들어 사용하였다.⁽⁷⁾ 또한 제조한 시료를 일정시간별로 상분리 현상을 관찰하였다.

2.2 화학적 / 물리적 분석장치 및 방법

7개의 실험용 연료의 초음파에너지 부가에 따른 화학적특성을 알아보기 위하여 핵자기공명분광법(¹H-NMR spectrum)에 의하여 연료의 분자구조 해석을 하였다. 핵자기 공명이론은 어느 한 방향으로 자전하는 핵이 다른 방향으로 자전하는 핵으로 바뀌는 현상, 즉 한 방향의 핵 스핀이 다른 방향의 스핀상태로 전이하는 것을 의미한다. 수소 원자핵에서 보면, +1/2 스핀에서 -1/2 상태로 또는 그 반대로 전이하는 현상을 뜻한다. 따라서, 이러한 전이를 일으키기 위해서는 두 상태의 에너지 차이만큼의 에너지를 흡수하거나 방출해야만 한다. ¹H-NMR은 분자의 모양 및

구조에 관한 정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 특히 분자를 구성하고 있는 각종 형태의 수소의 화학적 환경에 관한 정보를 얻을 수 있으므로 취급하고 있는 분자의 구조를 확인할 수 있다. 본 실험에 사용된 ¹H-NMR 분광기는 400MHz의 진동수를 가진 기기로서 Fig. 2는 그 개략도를 나타낸 것으로 구성은 전자석, 라디오파 발생장치, 시료관 및 자기코일로 구성되어 있다. 실험에 사용된 유화연료는 ¹H-NMR용 튜브에 4cc를 채우고 이것을 희석시키기 위하여 CDCl₃ 1cc를 혼합하여 실험을 하였다.

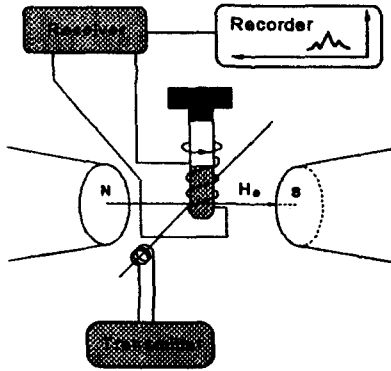


Fig.2 Schematic Diagram of ¹H-NMR Spectrometer

유화연료의 물리적 특성을 확인하기 위해 계면활성제를 혼합한 것과 혼합하지 않은 유화연료를 각각 상온 20°C 상태에서 표면장력, 점도를 측정하였다. 유화연료를 제조한 후에 그 특성의 변화가 일어나기 전에 각종 실험을 하였다. 표면장력은 링법을 이용하여 측정하였는데 먼저 증류수를 이용하여 기준값을 구한 후에 아래의 공식을 이용하여 계산하였다.

$$T = W / [2\pi(r_1 + r_2)] \quad (1)$$

여기서 r₁은 금속판의 내반경, r₂는 외반경이다.

점도는 구름 및 마찰운동을 할 수 있는 구마찰점도계를 이용하여 구가 낙하하는 시간을 측정하여 아래의 식을 이용하여 점도를 계산하였다.

$$\eta = k(\rho - \rho_f) t \quad [cp] \quad (2)$$

여기서 k, ρ는 각각 0.0614, 2.216이며 이 값들은 점도계에 따라서 다르게 나타난다. 측정하고자 하는 액체의 밀도 ρ_f는 비중계를 사용하여 측정

하였다.

2.3 분무입경측정

분무입경을 표현하는 방식에는 표면 평균직경, 체적 평균직경 등의 여러 가지가 있으나 Sauter 평균직경(SMD)이 액적들의 관통력과 질량전달 및 열전달의 중요과정을 특성화시키기 때문에 액적에 분무의 해석에 가장 널리 이용되고 있다.⁽⁸⁾ 본 실험에서도 분무입경으로 SMD를 측정하였다. 분무입경을 측정하기 위하여 Fraunhofer 회절원리를 이용한 분무입경측정장치(Malvern system)를 이용하였으며 Fig.3에 그 원리를 나타내었다.

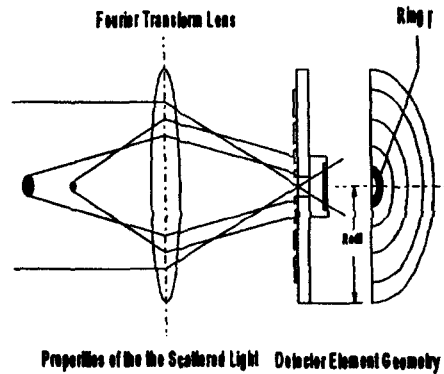


Fig. 3 Principle of Particle Size Analyzer

Fraunhofer 회절이란 광원과 상이 나타나는 스크린이 회절을 일으키는 좁은 슬릿과 무한한 거리로 떨어져 있을 때 생기는 회절을 말하는 것으로 광원과 슬릿 사이의 거리가 멀 때 슬릿과 스크린에 도달하는 빛은 평면파가 되는데 이를 가리킨다. 이때 광로상에 액적이 존재하면 그 액적에 의하여 회절된 산란각은 액적의 크기에 반비례하게 된다.

분무입경 측정에 사용된 광원은 He-Ne레이저(2mW, λ=633nm)를 사용하였고, 빔 확장기는 9mm이다. 튜비에 변환렌즈의 초점거리는 300mm이고, 렌즈와 분사노즐 중심축까지의 거리를 350mm로 하였으며, 사용렌즈의 분무입경 측정범위는 5.8~564 μm로 하였다.⁽⁹⁾ Fig. 4는 분무입경 측정에 사용된 전체적인 시스템의 구성도이다.

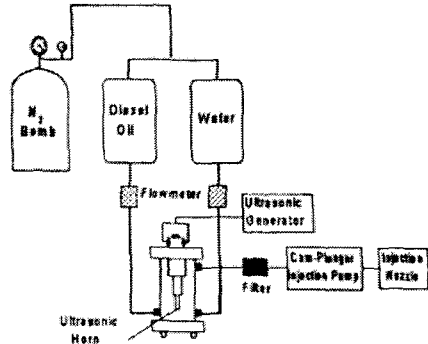


Fig. 4 Schematic Diagram of Experimental Apparatus for Measuring Drop Size

구성은 크게 나누어 분무입경 측정장치부와 연료공급장치부로 나눌 수 있다. 연료의 분무는 캠-플런저 방식의 분사펌프를 사용하였으며, 경유와 물은 초음파 연료공급장치의 하단부로 유입되어 초음파에너지에 의하여 혼합된 후 상부로 유출되어 펌프 구동 전에 120메시 필터를 설치하여 슬러리를 제거할 수 있도록 하였다. 회전수는 디젤기관의 공회전 속도를 고려하여 600rpm으로 고정하여 실험하였다. 분사노즐은 X-Y 테이블에 설치하여 분사노즐의 축방향 거리에 따라 정확히 이송되도록 하였으며, 분무실에는 부유하고 있는 미립자들이 측정에 영향을 미치지 않도록 하기 위해 보다 빨리 제거될 수 있도록 배기팬을 설치하였다. 그리고 측정위치는 디젤분사노즐의 분열길이가 보통 10~30mm로 보고되고 있음을 고려하여 분무축상에서 노즐 팁으로부터의 거리를 55mm로 고정하여 실험하였으며 분사압력은 기존의 와류실식 또는 예연소실식 기관에 많이 이용되는 120kg/cm²으로 고정하였다. 또한 분사노즐은 디젤기관용 핀노즐을 사용하였고, 데이터는 1회 측정시 1000개의 샘플을 측정하여 3회 반복측정하였다.

2. 4 미세폭발현상

유화연료입자가 고온속으로 유입되었을 때 유화연료 내부에 분산된 조그마한 물입자들이 초기에는 증발하다가 격렬하게 폭발되어 유화연료

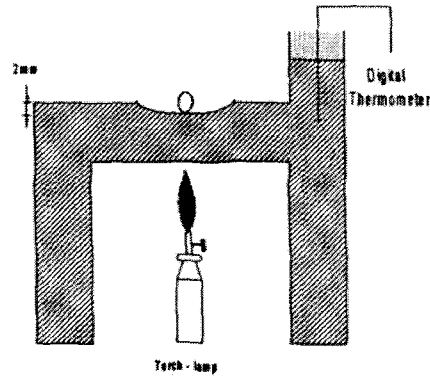


Fig. 5 Schematic Diagram of Microexplosion

입자의 미립화가 촉진되고 연소가 개선되는데 이러한 현상을 유화연료만이 가지고 있는 독특한 현상으로 미세폭발현상이라고 한다. 유화연료의 2차 미립화현상인 미소폭발현상을 규명하기 위하여 열판상에 대기압조건하에서 시린지를 이용하여 미소량의 유화연료를 낙하시켜 그 현상을 관찰하였다. Fig. 5에서 보는 것처럼 평판속에 열의 대류효과를 일정하게 유지시키기 위하여 엔진오일을 삽입시킨후 토치램프를 이용하여 410℃로 가열한 후 시린지를 이용하여 혼합한 액체를 자유낙하시켜 유화연료의 미소폭발현상을 관찰하였다. 촬영은 8mm 비디오 카메라를 이용하여 연속촬영을 한후에 VTR편집기와 한장면씩 화상을 처리할수 있는 이미지 보드를 이용하여 화상처리를 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3. 1 상분리 현상

Fig. 6은 계면활성제를 혼합하지 않고 초음파 에너지공급장치를 이용해서 혼합한 후의 상분리율을 나타내고 있다. 물의 함량이 많을수록 상분리비율이 높고 물의 양이 적고 초음파에너지를 가한 시간이 긴 유화연료가 시간이 지남에 따라 비교적 안정된 상태를 나타내었다.

Fig. 7, 8은 H.L.B 값이 3.78인 유용성 계면활성제를 이용하여 초음파에너지를 5분과 10분동안 조사하여 상분리 현상을 비교하였다.

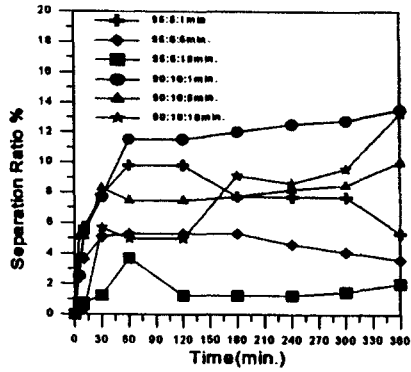


Fig. 6 Separation Ratio of Emulsified fuel (unsurfactant)

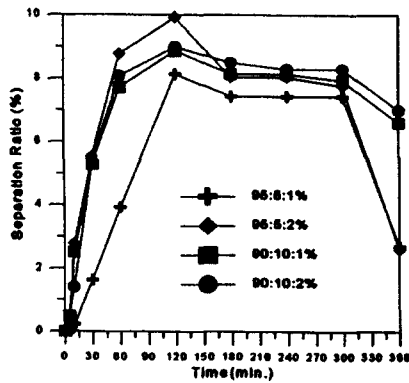


Fig. 7 Separation Ratio of Emulsified Fuel (5min)

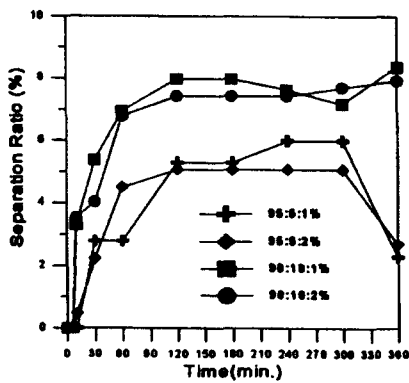


Fig.8 Separation Ratio of Emulsified Fuel (10min)

상기의 결과로부터 계면활성제를 혼합하지 않아도 양호한 결과를 얻을수 있었음을 알수 있

었다.

3. 2 물리적 성질의 비교

유화연료의 점도와 표면장력은 상온 20℃에서 10회 측정하여 평균값을 취하였다.

Fig. 9는 점도의 결과를 나타낸 것으로 초음파를 가한 경우는 기존의 경유보다 약 4.5%의 점도의 감소효과가 있었고 물의 함량을 증가시켰을 경우에는 약 7%의 점도감소효과가 있었다.

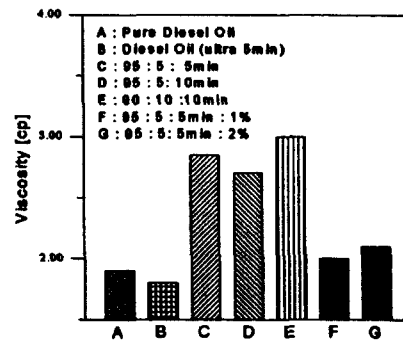


Fig. 9 Viscosity of Emulsified Fuel

Fig. 10은 표면장력의 영향을 나타낸 것으로 초음파를 가했을 경우가 순수경유보다 약 5.6%의 감소가 되었고 물의 함량을 증가시킴으로서 약 1.6%의 증가를 가져왔다. 계면활성제를 증가시킨 경우에는 표면으로 흡착하는 양이 커져서 점점 더 탄화수소값에 가까워져 결과적으로 표면장력이 낮아진다.⁽¹²⁾ 이것으로 초음파에너지로 인하여 직접적으로 SMD의 증가 경향을 알수 있다.

3. 3 화학적분석

Fig.11은 ¹H-NMR 스펙트럼 측정결과중 순수 경유와 초음파 에너지를 5분 조사한 경우의 대표적인 결과를 나타내고 있다. 그림에서 가로축은 화학적 이동상수로 실측의 화학주파수를 분광기의 주파수로 나눈 값으로 ppm($\times 10^6$)으로 표시되며, 세로축은 peak height를 나타낸다. 각 영역에서 피크를 형성하고 있음을 알수 있다.

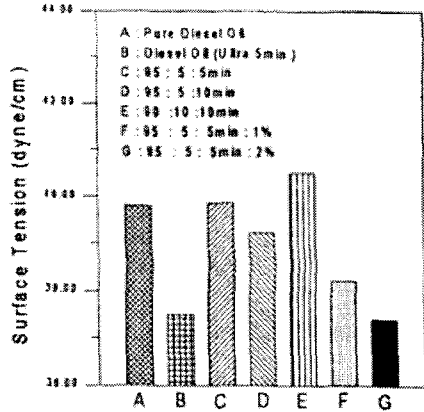
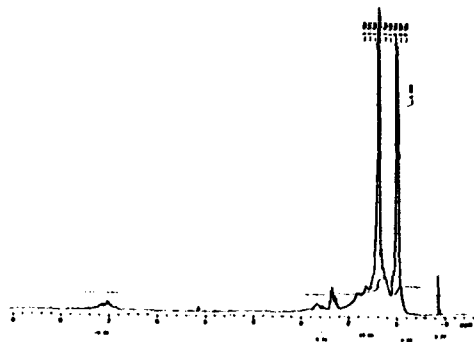
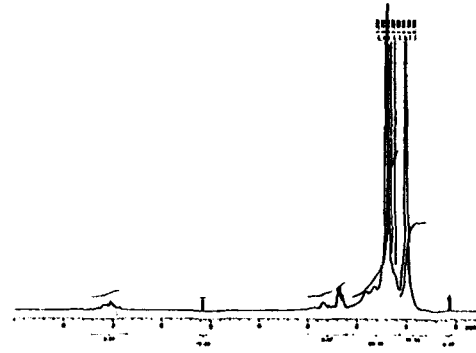


Fig. 10 Surface Tension of Emulsified Fuel

이 각영역은 서로다른 화학적 특성을 나타내고 있는데 일반적으로 가로축 영역이 6.2~9.2ppm은 방향족 H_a (ring-aromatic), 4.5~6.0ppm은 H(olefin), 2.0~4.0ppm은 방향족 H_o (α -methyl:CH), 1.0~2.0ppm은 파라핀계 H_p (methylene:CH₂), 0.5~1.0ppm은 파라핀계 H_r (methyl:CH₃)를 나타낸다. 그림에서 보는 것 처럼 순수경유와 초음파에너지를 이용하여 제조한 유화연료는 각 영역에서의 피크의 크기와 면적은 서로다르지만 화학적 이동위치는 일정함을 알 수 있다. 이것으로 초음파에너지는 작용기의 상대량에는 영향을 미치지만 새로운 작용기를 생성시키지는 못하는 것을 알 수 있고 연료에 초음파에너지를 부가함으로써 공동현상으로 인하여 화학적변화가 나타났음을 알 수 있다.⁽¹⁰⁾



(a) Pure diesel oil



(b) Ultrasonic energy 5min

Fig. 11 ¹H-NMR spectrum of Pure Diesel Oil

Fig. 12는 방향족 성분과 파라핀계 성분의 체적비를 보여주고 있다. 순수경유와 초음파에너지를 이용하여 혼합한 시료는 방향족 성분(H_a , H_o)이 10%전후이고 거의 대부분이 파라핀계성분이 차지하고 있는 연료임을 알 수 있다. 그러나 계면활성제를 혼합한연료는 상대적으로 파라핀계성분이 적고 방향족 성분이 많음을 알 수 있다.

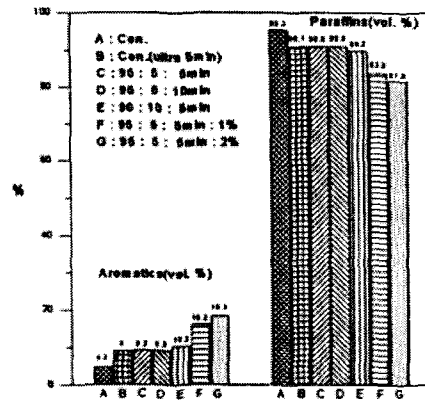


Fig. 12 Aromatic vs Paraffins Volume Percent of Emulsified Fuel

Fig. 13은 각 ¹H-양성자들의 분포비율을 나타내고 있다. 전체적으로 파라핀계열의 성분이 더 많이 분포하고 있고 H_r 전체적으로 순수경유보다 그비율이 높는데 그 이유는 초음파에너지로 인하여 경유에 함유되어 있는 복잡한 구조인 고리모양의 탄화수소계가 사슬모양의 탄화수소계

로 바뀌어 졌기 때문이다.⁽⁸⁾

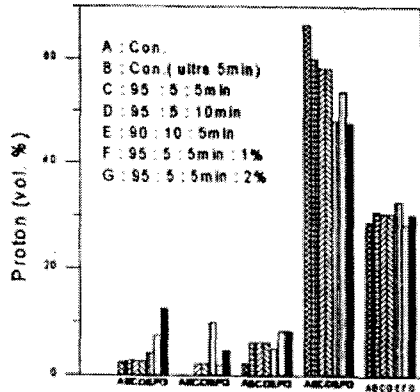


Fig. 13 Proton percent of Sample Fuels

Fig. 14는 BI를 나타낸 것으로 정의는 다음과 같다.

$$BI = \frac{\text{methyl peak height}}{\text{methylene peak height}}$$

그림에서 알수 있는 것처럼 순수경유와 초음파를 5분동안 가했을 경우에는 시간이 지남에 따라 methyl기가 감소하여 초음파를 가한 것이 더 증가를 하였고 결합에너지의 차이에 의해서 낮은 결합에너지를 가진 것이 먼저 분해되어지고 높은 결합력을 가진 것이 나중에 분해되는 원인으로 인하여 동일 함량인 경우에 초음파에너지를 길게 가하면 methyl기가 감소하여 더 적은 결과를 나타낸다. 또한 경유에 물을 첨가하면 물이 분해되어 수소가 연료와 혼합되어 더 증가하는 것으로 생각된다.

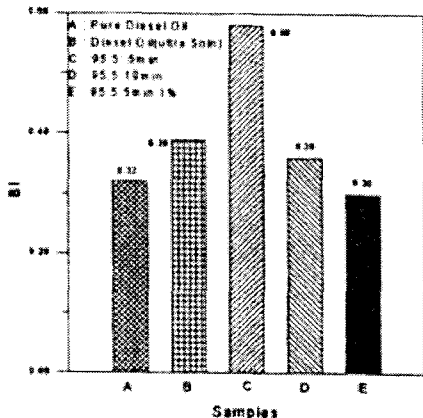


Fig. 14 BI of Sample by ¹H-NMR

3.4 분무입경 측정

Fig. 15는 초음파 연료공급장치를 이용하여 유화연료를 제조한 후 분무입경측정장치를 이용하여 SMD를 측정한결과를 나타내고 있다. 초음파에너지 공급장치를 이용하여 유화연료를 혼합할수 있다는 것을 육안을 통해서 알수 있었고 SMD측정결과 순수경유에 비해서 초음파에너지를 가했을 때 약 3%의 SMD감소효과가 있었고다. 이러한 현상은 초음파에너지를 연료에 조사함으로써 공동현상으로 화학적 변화를 일으켜 연료의 분무입경이 작아진 것이다.

또한, 초음파에너지를 이용해서 유화연료를 제조하였을 때 순수경유에비해서 5%, 10%몰의 함량을 증가시킴에 따라 각각 15.6%, 20.1%씩 SMD가 증가하였다. 또한 몰의 함량을 증가 시킴에 따라서는 5%혼합하였을 때 보다 10%혼합하였을때에 약 4%증가 하였다. 즉, 순수경유에 물을 첨가하면 SMD가 증가하는 것을 확인할수 있었다. 또한 증가의 폭이 크지 않음을 알수 있으므로 초음파에너지를 이용하여 혼합한결과가 양호하다는 것을 알수있었다.

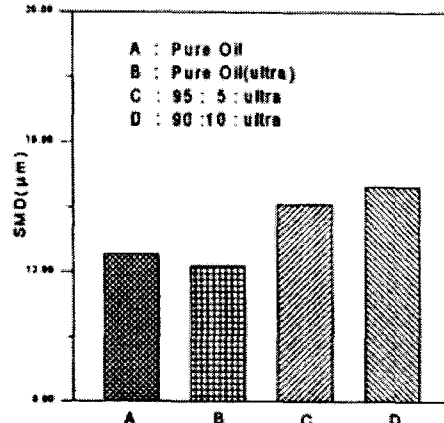


Fig. 15 SMD of Pure Diesel Oil and Emulsified Fuel

3.5 미세폭발현상

유화연료는 2차 미립화현상인 미세폭발이 발생한다. 미세폭발현상은 4단계의 과정을 거쳐 발생한다. 유화연료액적이 열판으로 낙하하였을때는 불안정한 구형이고, 입자가 증발하면서 열판과 입자사이에서 약간의 증발현상이 발생하면서

구형의 형태가 되어가고, 내부에서 복합적인 물입자가 형성되면서 유화연료가 수평으로 움직이며 마지막으로 눈으로 관찰할 수 없을 정도의 작은 입자들로 폭발하게 된다.⁽¹¹⁾ Fig.16은 물의 함량을 5% 혼합하여 5분간 초음파에너지를 이용하여 혼합한 연료를 사용한 결과이다. 대표적인 현상을 나타낸 것으로 초기에는 1단계에서는 액적이 자유낙하하면서 주위의 고온의 영향으로 증발현상이 나타나면서 반구의 형태이지만 2단계에서는 물입자가 비동점으로 진행이 되는 과정으로 구형의 형상을 나타내고 있고 3단계에서는 미소폭발현상이 나타나기 바로 전 단계로서 물입자가 내부적으로 충분히 에너지를 받아서 유화연료가 열판에서 약간 튀는 현상을 나타내고 있다. 마지막단계에서는 분열, 파괴되는 모습을 보여주고 있다.

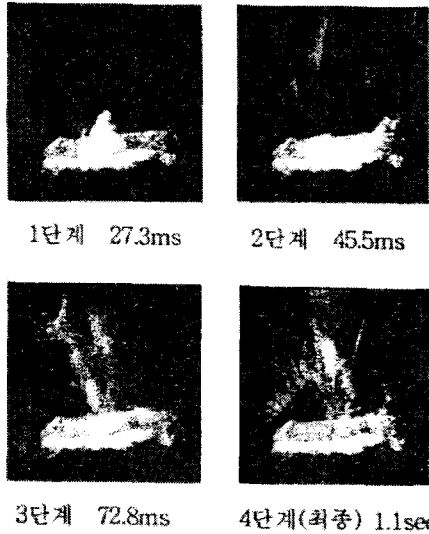


Fig. 16 Microexplosion of Emulsified Fuel

4. 결 론

초음파 연료공급장치를 이용하여 유화연료를 혼합한 후 그 연료로서의 특성 및 분무상태를 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 상분리현상은 물의 함량이 적고 초음파에너지를 가한 시간이 길수록 안정된 모습을 보였다.
- 2) 점도는 물의함량을 증가시킬수록 약 7%, 표

면장력은 약 1.6%의 증가효과를 얻을 수 있었는데 이것으로 SMD의 증가 경향을 알 수 있었다. NMR분석결과 성분의 분포비율은 방향족이 10%정도지만 계면활성제를 혼합한 경우에는 약 17%정도를 나타내고 있다.

3) 분무입경은 순수경유에 비해서 초음파에너지를 가한연료가 3%의 입경감소되었지만 물의 함량을 5, 10%씩 증가를 하였을때는 오히려 순수경유에 비해서 15.6%, 20.1%씩 증가하였다. 또한 미소폭발은 4단계의 과정으로 폭발하는 것을 알 수 있었다.

4) 유화연료의 미세폭발현상을 확인한 결과 4개의 단계를 거치면서 수액이 분열, 파괴되는 현상을 관찰할 수 있었다.

후 기

"이 논문은 1996학년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음"이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김 용서 외 3명, "디젤기관의 고압직접분사 연소특성에 관한 연구", 국방과학연구소 연구보고서, 90-5-06, 1991.
2. 장 영준 외 4명, "디젤 분무 액적의 크기와 속도 동시계측에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집, 2(5), p11~22, 1994.
3. P.L.Zhou et al, "Emulsified fuels atomization study with high speed photographic technology", PD-Vol. 50, Emerging Energy Technology, p23~30, ASME, 1993.
4. 山崎博司, 津江光洋, 角田敏一, "乳化燃料の蒸發と燃焼", 日本機械學會論文集(B編), 58卷 546號, 1992
5. 권 철홍의 7명, "압축점화기관용 유화연료 이용기술 개발연구(II)", 한국에너지기술연구보고서 KIER-941104, pp33~34, 1994
6. 류 정인의 2인, "초음파 연료공급장치용 디젤 자동차의 성능향상에 관한 연구(II)", 한국자동차공학회 논문집, 2(1), SAE No.943700, 1994

- Combustion Systems - Concepts and Applications", POWER SYSTEMS, pp 279~295, 1976
- 8) 최 두석, "초음파 에너지 부가 디젤유의 분무 특성과 기관성능특성에 관한 연구", 충남대학교 대학원 박사학위논문, 1996
- 9) Reference Manual "System 2600-Instruction Manual", Malvern Instruments Ltd.
- 10) 千葉近, "超音波による液體微粒化の研究", 日本機械學會紙(B編), 51卷 471號, pp3589~3598, 1985
- 11) M. Tsukahara and Y. Yoshimoto, "A Study on the evaporation of an emulsified fuel droplet in a closed vessel", Proc. 1st KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 1, 1988
- 12) 조 순채 외 3인, "클로이드와 계면활성제", 대광서림, 1995