

분사노즐 형상에 따른 유화연료의 분무 미립화 및 물성

김 용 국*¹⁾ · 류 정 인²⁾

충남대학교 기계공학과*^{1,2)}

Atomization Characteristics for Various Injection Nozzle Type and Property Changes

Yongguk Kim*¹⁾ · Jeongin Ryu²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, BK21 Mechatronics Group, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received 24 July 2009 / Accepted 16 November 2009)

Abstract : The objective of this experimental study is to verify atomization characteristics of emulsified fuel. The emulsified fuel made of adding the ultrasonic energy is analyzed with atomization characteristics and chemico-physics. As water contents within emulsified fuel and needle angle increase, SMD, viscosity and surface tension were analyzed. By measuring the distribution percentage of hydrogen volume by ¹H-NMR spectrum, the proportion of aromatics and paraffins is analyzed and compared each other. The results of study is as follows. First, as water contents within emulsified fuel and needle angle of nozzle increases, SMD increases. Second, for the distribution percentage of hydrogen volume, the distribution percentage of aromatics is about 10% and the rest portion is paraffins.

Key words : Emulsified fuel(유화연료), Ultrasonic energy(초음파에너지), Atomization characteristics(미립화특성), SMD(Sauter Mean Dia.), ¹H-NMR(수소 핵자기분광)

1. 서론

디젤기관은 가솔린기관에 비해 연료의 경제성과 우수한 출력성능을 가지나, 대기 환경보전법에 의하여 엄격한 환경규제를 받는 디젤기관의 배기물질인 질소산화물, 입자상 물질, 분진 등에 의한 대기 환경오염에 대응·개선해 나감은 지속적인 과제로 남아있다.

출력성능의 향상과 유해 배기가스의 저감은 어느 정도 상반된 특성을 가지고 있으며 동시 향상을 위해서는 분사된 연료를 적절한 시기에 완전연소 시켜야 하는데, 이를 위해서는 연료의 분무특성들과 연료의 물리·화학적 물성분석이 병행되어야 한다.

즉, 분무입경은 되도록 작게 하여 연료의 증발을 촉진시키고 동시에 연소시간을 단축시키면서 완전연소를 이루는 것이 출력성능 향상과 유해 배기가스 저감에 필수적이다.²⁾ 완전연소를 위한 방법에는 여러 가지가 있다. 연료를 미립화 분무시키는 방법, 분무 관통력이나 연소실 내 분산성을 개선하는 방법, 와류에 분무를 강제회전하여 공기와의 혼합성을 증대시키는 방법, 연소실에 벽면 충돌시켜 연소실내의 전방향으로 분무를 확산시키는 방법, 초음파에너지를 조사하여 연료입자를 미립화하는 방법, 경유와 물을 혼합한 유화연료의 이용 등이다.⁶⁾

물을 액체연료와 혼합하여 유화연료로 사용하는 방법은 열효율을 거의 저하시키지 않고도 질소산화

*Corresponding author, E-mail: kimykook@korea.kr

물 및 입자상 유해 배기물질을 동시에 저감시킬 수 있는 기술로서 분무 관통력 증가에 따른 주위공기 혼입량 증대시키고, 연소실 내에 라디칼 형성을 충분하게 하여 수성가스 반응을 통해 완전 연소시켜 엔진효율을 향상시키는 등의 큰 장점이 있다. 그러나, 장기간 보관시 유화연료의 상분리 현상으로 인해 연료의 안정성 문제가 발생하는데, 유화연료의 기계적 혼합시설과 현 주유소에 저장 및 공급시설의 확보가 어려운 실정이다. 상기와 같은 유화연료의 장단점을 보완하기 위하여 초음파 에너지를 이용하여 유화연료를 제작함과 동시에 연소시키는 방법이 지속적으로 연구되어지고 있다.^{1,5)}

이에 본 연구에서는 초음파에너지 부가에 의한 유화연료를 제조하여 유화연료의 물리 화학적 특성 및 분무특성 분석에 중점을 두어 다음과 같이 수행하였다. 첫째, 연료 분사노즐의 형상변화에 따라서 유화연료와 순수경유의 평균 분무입경을 비교·분석하였다. 둘째, 함수별 유화연료의 평균입경을 비교·분석하였다. 셋째, 순수경유에 대하여 유화연료의 평균 분무입경의 변화가 발생하여 물리화학적 분석을 통하여 원인을 규명하고, 분자구조를 순수 경유와 비교·분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 분무입경 측정

분무입경 측정실험 개략도를 Fig. 1에 도시하였으며 크게 초음파 유화연료공급장치부와 분무입경 측정장치부로 구성되어 있다.

유화연료공급장치부에서는 유화연료내 함수질량비가 각각 0, 10, 20, 30%이 제조되도록 하였다. 연료의 분무는 캠-플런저 방식을 이용하였으며, 회전수는 캠에 설치한 포토센서에서 발생한 신호를 전자회로를 통하여 측정하였다. 노즐로의 연료공급은 유화연료의 제조시간을 고려하여 캠의 회전수 조절기를 700rpm으로 고정시켰으며, 분무입경 광학측정장치부에서 분무입경이 측정되는 구조로서 장치 및 주요 설정값을 Table 1에 나타내었다.

분무선단 거리에 따른 입경측정을 용이하게 하고자 분사노즐을 X-Y 테이블에 고정시켜 분무실로 분사되도록 하였으며, 분무실은 부유하고 있는 미립

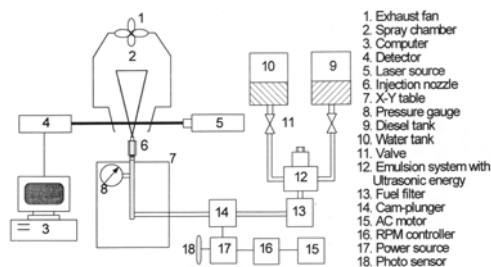


Fig. 1 Experimental apparatus for measuring SMD

Table 1 Specification and settings of test equipments

1. Injection
- Nozzle type : 1-hole pintle common use
- Hole Dia./Needle Lift : 1.02mm/ 0.45mm
- Injection Pressure : 120kgf/cm ²
2. Setting of particle analyzer
- Laser transmitter : 2mW, He-Ne Laser (λ=633nm)
- Focal length : 300mm
- Measuring particle size : 5.8~564mm
3. Data acquisition & calculation
- Average of 10 times (2,000 sampling/ time)

자가 빨리 제거될 수 있도록 배기팬을 설치하였다. 단, 순수경유(함수량 0%) 입경측정시는 연료탱크에서 물은 유출되지 않고 초음파에너지도 부가하지 않은 상태이다.

분무입경 측정장치의 특성상 입자군을 구형으로 가정하므로 미리 평균입경 측정위치를 결정하였는데, 측정위치는 분무의 분열길이(breakup length)가 10~30mm로 알려져 있으므로⁵⁾ 노즐팁 선단으로부터 40~100mm까지 20mm간격으로 유화연료내의 함수량과 분사노즐의 형상변화를 파라미터로 하였다.

분무입경 광학측정은 Fraunhofer 회절원리를 이용한 영국 Malvern 2600C를 사용하였다.

2.1.1 초음파 유화연료공급장치

유화연료의 장기간 보관 시 발생하는 상분리 현상과 장치가 육중하여 탑재가 어려운 등의 기계적 교반장치의 단점에 착안하였다. 본 실험에서는 비교적 탑재가 용이하며 상분리 방지를 위한 유화제를 사용하지 않고 제조와 동시에 공급할 수 있는 초음파 유화연료공급장치를 구성하였다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 장치는 크게 초음파에너지 발진·부가장치부와 연료와 물의 혼합부로 구

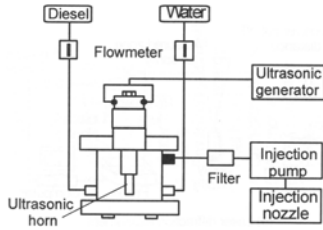


Fig. 2 Schematic diagram of emulsified fuel feeding system

성되어 있다. 초음파 발진장치는 전기적 신호를 진동자에 가하여 기계적 진동 출력을 내기 위한 장치로서, 진동자와 혼은 볼트체결방식이다. 임의의 운전조건에서 양질의 유화연료의 제조를 위해서는 에너지 전달효율을 극대화 시키는 혼의 설계가 중요한데, 진폭확대율이 가장 큰 계단형 혼으로서 제작상·내구성 요인을 고려하여 AI-70계열이며 단면적비 4:1 설계 제작하였다.^{2,8)}

초음파 유화연료제조장치 내로 물과 경유의 유입비를 조정하기 위하여 제조 챔버로 유입이전에 유량계를 설치하였다. 혼의 말단부에서 초음파 에너지가 최대이므로 챔버내에 경유와 물이 만나는 지점에 혼의 말단부를 위치시켰으며, 바닥부분에 반사판을 부착하여 초음파 진동에 의해 발생된 고온·고열의 공동들에 의한 챔버손상을 방지하고 전반사 조건이 되도록 하였다.

유화연료 제조시 유화제의 사용은 연소시 유해배기배출을 증가시키므로 본 실험에서는 유화제를 사용하지 않았으며 유화연료가 분사펌프로 공급되는 유로 중에 유화연료 공급장치를 위치시켰다. 장치에 의해 유화연료 생성과정에 발생한 슬러지는 분사펌프 전단에 스트레이너로 걸러냈다.

2.1.2 분사노즐 형상

본 실험에서 사용한 분사노즐은 여러 형식 중 예연소실식 디젤엔진에 많이 사용되는 핀틀형(pintle type)을 사용하였다. 핀틀형 분사노즐의 니들밸브 형상에 따른 분무입경을 조사하여 유화연료에 적합한 형식을 도출해 냄과 제조된 유화연료가 연료로서의 타당성을 고찰하고자 하였다.

실험에 사용된 노즐형을 Fig. 3에 도시하였다. 기존의 핀틀형 노즐의 니들각 -10° 인 니들밸브(needle valve)에 더하여 니들각 $5^\circ, 15^\circ$ 니들밸브를 제작하였으며, 개조된 분사노즐은 분무된 연료가 니들밸브에

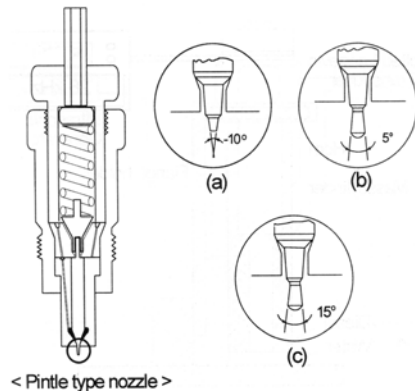


Fig. 3 Types of injection nozzle

강하게 충돌되도록 약간의 목(neck)을 가지도록 제작하여 노즐 형상별로 평균 분무입경을 비교하였다.

2.2 점도 및 표면장력

연소실 분무 및 연소조건에는 그에 부합되는 적절한 분무특성이 필요하며, 연료의 물성은 분무특성에 영향을 미치므로 유화연료의 물성측정이 필수적이다. 물성 중 점도와 표면장력은 분무특성에 영향을 미치는 주요 물성으로서 일반적으로 점도가 너무 크면 평균 분무입경이 과도하게 증가하고 입도분포도 광범위하게 넓어져서 연소불량을 초래하게 된다. 유화연료는 비뉴턴 점성특성을 가지며 함수량 증가에 따라 점성이 증가한다고 알려져 있다. 표면장력 측면에서 보면, 연료분무시 연료의 표면장력이 크면 분무입경이 커지므로 분무선단 도달길이 커지고 또한 분무각이 작아지게 된다.⁷⁾

Fig. 4에는 시료의 준비를 위한 장치개략도를 나타내었다. 본 실험에 사용된 시료는 유화연료내 함수율 별로 함수율 0(순수경유, 초음파 비부가), 5, 10%로서, 유화연료 제조시 초음파에너지를 부가한 경우와 계면활성제만으로 제조한 각각의 경우의 물성을 각각 비교하였다. 계면활성제는 H.L.B값이 3.78이며, Span85와 Tween80의 계면활성제를 각각 85%와 15%씩 혼합하였다.

시료의 표시는 O(diesel): W(water): 초음파부가시간(min.): 계면활성제량으로서 질량기준 비율로 나타내었다. 시료의 물성은 상온, 대기압 상태에서 낙구식 점도계와 링형 표면장력계로 각각 측정하였다.

2.3 분자구조

본 실험에서는 수소 핵자기공명(¹H-NMR)을 이용하여 분자구조를 해석하였고, 핵자기공명 분광기로는 Varian GEMINI200(200Mhz)를 사용하였다.

NMR 분석을 위한 시료는 물성측정 시료와 동일한 조성과 방법으로 제조하였으며, 준비된 시료를 각각의 NMR 튜브에 5cc씩 채우고 희석을 위한 촉매제로 CDCL₃ 1cc를 혼합·준비하였으며, 기준물질로 TMS(tetramethylsilan; Si(CH₃)⁴)를 사용하였다.

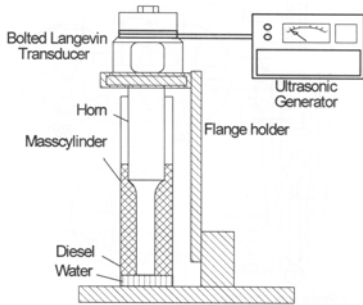


Fig. 4 Sample-arranging system for measuring characteristics

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무입경

Fig. 5에 유화연료 조성에 따라 함수율별로 평균 분무입경을 도시하였으며, 각 그래프는 노즐형상에 대하여 분무선단으로부터 위치에 따른 평균 분무입경(Sauter Mean Diameter)이다.

각 노즐의 분무선단으로부터 거리가 증가함에 따라 평균 분무입경이 증가하는 경향이 모든 함수율에 대하여 나타났다. 이는 분무액적은 하류로 진행함에 따라 액적이 분열(breakup) 및 증발(evaporation)하며 진행하나, 하류로 진행하면서 후속하는 액적들과의 응집(coalescence)과정을 지속적으로 거치기 때문이라 사료된다.^{2,5)}

니들의 각도가 -10°의 경우가 입경이 작게 나타났고 니들의 각도가 커질수록 입경이 커지는 경향이 모든 함수율에 대해서 나타나는데, 이는 니들의 각도가 커지면 강제적으로 분사각을 확장시켜 액적의 운동량이 감소하게 되어 공기와의 마찰에 의한 분무 액적의 증발이 약화되기 때문이다.

유화연료의 함수율이 증가함에 따라 평균 분무입

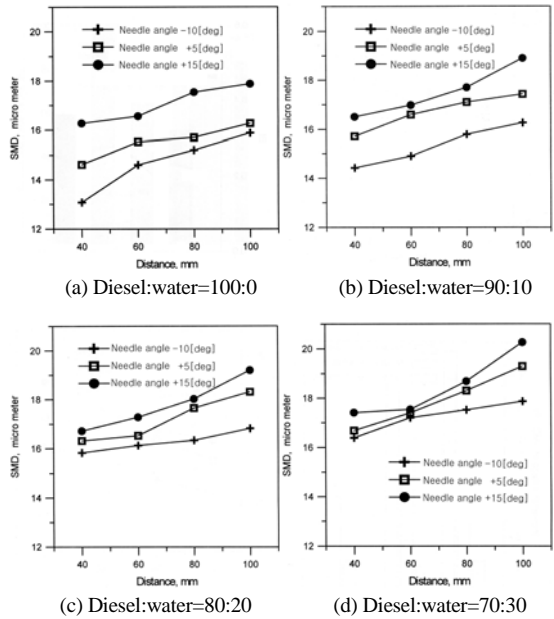


Fig. 5 SMD distribution for distance from injection nozzle

경이 커지는 경향을 보이는데 경유에 비하여 상대적으로 큰 입경을 가진 물의 비율이 증가하므로 전체적인 분무입경이 증가하기 때문으로 사료된다.⁷⁾

3.2 점도 및 표면장력

유화연료의 점도 및 표면장력은 표준상태에서 측정하여 평균값을 구하였다.

Fig. 6(a)는 점도의 결과를 나타낸 것으로 유화연료는 순수경유에 비하여 점도가 증가하는 경향을 보였다. 입자의 총표면적이 커지면 점도가 커지는 점을 고려하면 순수경유에 비해 액적지름이 큰 물이 연료 내에 존재함으로써 유화연료의 입자의 총표면적이 증가하기 때문으로 사료된다. 유화제를 첨가한 경우, 유화제에 의한 계면 이완작용으로 인하여 입자의 총표면적이 줄어들기 때문에 첨가하지 않은 경우보다 점도는 감소하게 된다.⁶⁾ Fig. 6(b) 표면장력 측정결과를 나타낸 것으로 점도에 비하여 함수에 대한 영향이 비교적 적게 나타난다. 동일한 조건에서는 초음파에너지 부가시간이 길수록 점도 및 표면장력이 낮게 나타나는데, 이는 초음파에너지에 의한 계면 이완작용 때문으로 사료된다.^{2,3)} 또한, 유화제를 첨가한 경우에서도 계면 이완작용에 의한 표면장력의 감소를 확인할 수 있다.

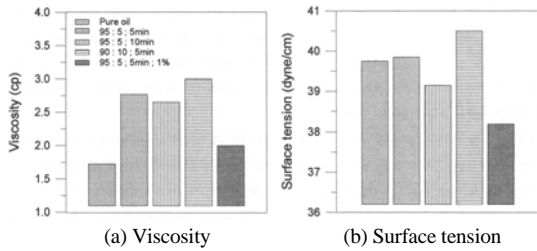
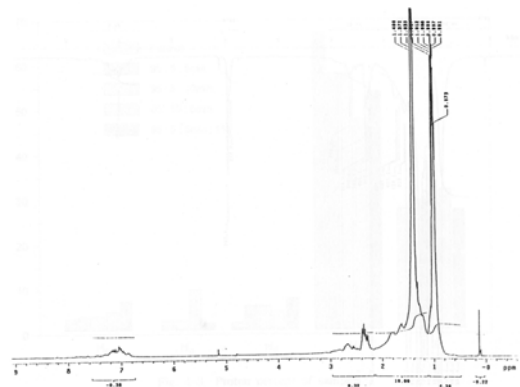


Fig. 6 Increase percentage of SMD reference for pure diesel

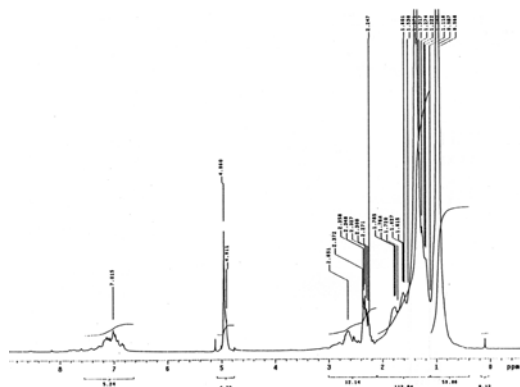
3.3 분자구조

Fig. 7은 유화연료내 함수율 중 순수경유 및 유화연료(함수량 5%, 초음파 부가 5min)의 $^1\text{H-NMR}$ 스펙트럼을 대표적으로 나타내었다. 가로축은 화학적 이동상수로 실측의 화학주파수를 분광기의 주파수로 나눈 값으로서 ppm(x100)으로 표시되며, 세로축은 최고치(peak height)를 나타내고 이는 각 영역에서 피크를 형성하고 있음을 나타낸다. 각 영역은 서로 다른 화학적 특성을 나타내고 있는데 일반적으로 가로축 영역의 6.2~9.2ppm은 H_a (ring-aromatic), 2.0~4.0ppm은 H_α (α -methyl; CH), 1.0~6.0ppm은 H_β (methylene; CH_2), 0.5~1.0ppm은 H_γ (methyl; CH_3), OH는 일반적으로 1.0~6.0ppm범위다.⁷⁾ 그림을 고찰하면 순수경유와 초음파에너지를 이용하여 제조한 유화연료는 각 영역에서의 피크의 크기와 면적은 서로 다르지만 화학적 위치는 일정함을 알 수 있다. 이로서 초음파에너지는 작용기의 상대량에는 영향을 미치지만 새로운 작용기를 생성시키지는 않음을 알 수 있다. 유화연료의 결과가 경유에 비해 두드러진 현상은 5ppm 근처에서 새로운 작용기가 나타나는데 이는 유화연료내 물의 영향에 의한 OH기로 추정되며, OH기의 peak height는 유화연료내 함수량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이는 유화연료내 함수량 증가에 따른 OH기의 증가로 사료된다.⁷⁾

각 작용기 피크들의 적분강도는 각 작용기들에 대한 상대량을 나타내므로 식 (1)~(4)에 의하여 Fig. 8과 같이 탄화수소계에 대해서 수소체적 분포비율을 계산할 수 있다. 전체적으로 파라핀계열의 성분이 더 많이 분포하고 있고 H_γ 가 순수 경유보다 비율이 높는데 그 이유는 초음파에너지로 인하여 함유되어 있는 복잡한 구조인 고리모양의 탄화수소계가 사슬모양의 탄화수소계로 바뀌었기 때문이다.^{5,7)}



(a) Pure oil



(b) W/O = 95:5;5min

Fig. 7 $^1\text{H-NMR}$ spectrum of pure oil and emulsified fuel

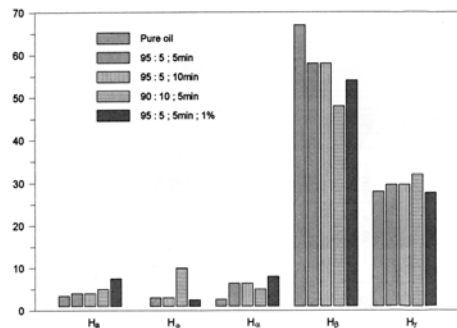


Fig. 8 Proton percentage of samples

방향족 성분과 파라핀계 성분의 체적비를 Fig. 9에 보여주고 있는데, 유화연료는 방향족성분(H_a , H_α)이 10% 전후이고 대부분 파라핀계 성분이 차지하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 계면활성제를 혼합한 유화연료는 상대적으로 파라핀계 성분이 적고, 방향족 성분이 많음을 알 수 있다.

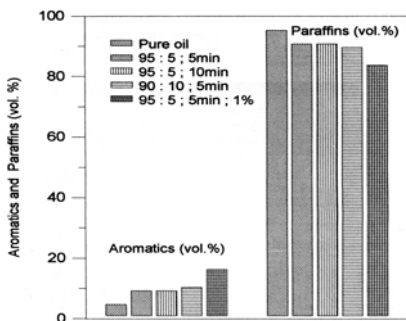


Fig. 9 Aromatics vs. paraffins volume percentage of samples

$$H_{\alpha} + H_{\alpha} + H_{\beta} + H_{\gamma} = 100(\text{vol.}\%) \quad (1)$$

$$H_{\alpha}(\text{vol.}\%) = \frac{H_{\alpha} \times 100}{H_{\alpha} + H_{\alpha} + H_{\beta} + H_{\gamma}} \quad (2)$$

$$H_{\alpha}(\text{vol.}\%) = \frac{H_{\alpha} \times 100}{H_{\alpha} + H_{\alpha} + H_{\beta} + H_{\gamma}} \quad (3)$$

$$H_{\beta}(\text{vol.}\%) = \frac{H_{\beta} \times 100}{H_{\alpha} + H_{\alpha} + H_{\beta} + H_{\gamma}} \quad (4)$$

$$H_{\gamma}(\text{vol.}\%) = \frac{H_{\gamma} \times 100}{H_{\alpha} + H_{\alpha} + H_{\beta} + H_{\gamma}} \quad (5)$$

4. 결론

본 연구는 미립화 측면에서 유화연료가 연료로서 타당함을 밝히고자 초음파에너지를 부가하여 제조된 유화연료의 함수량, 분사노즐의 니들형상에 따른 분무입경을 조사·비교하였으며, 물리적 화학적 분석을 수행하여 분무입경 변화를 함께 고려하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유화연료 내의 함수량을 0~30%까지 증가시키며 평균 분무입경 측정결과 분무선단 거리에 따라 분무입경이 증가 하였으며, 동일 분무선단 거리에서 유화연료내 함수량이 증가함에 따라서 평균 분무입경이 증가한다.
- 2) 분사노즐의 니들 형상별 평균 분무입경에서는 액적 운동량 감소로 인하여 니들각도가 증가함에 따라 분무입경은 증가하는 경향을 보인다.
- 3) 초음파에너지 부가시간이 일정한 조건하에서 점도 및 표면장력은 유화연료내 함수량이 증가함에 따라 점도와 표면장력은 증가하며, 계면활성제 혼합시 점도와 표면장력이 감소한다.

- 4) 핵자기 공명 분광법에 의해 수소체적의 분포비율은 방향족이 약 10% 정도이며 나머지 파라핀계가 대부분 차지하며, 유화연료의 경우 물의 영향에 의한 OH기가 나타나며 함수량이 증가함에 따라 OH기의 상대량도 증가한다.

References

- 1) M. Tsukahara, "W/O Emulsion Realizes Low Smoke and Efficient Operation of DI Engines without High Pressure Injection," SAE 891841, 1989.
- 2) J. I. Ryu, A Study on the Development of Ultrasonic Fuel Atomization System for Complete Combustion in Diesel Engine, Report for Objective Basic Research, KOSEF, 1993.
- 3) D. S. Choi, J. H. Seol and J. I. Ryu, "A Study on the Performance of Diesel Automobile of Ultrasonic Fuel Supply System(I)-About the Droplet Size Distribution of Ultrasonic Fuel Supply System," Transactions of KSAE, Vol.2, No.1, pp.1-8, 1994.
- 4) J. I. Ryu, J. D. Jeong and J. G. Yang, "A Study on the Performance Improvement of Diesel Automobile Engine with Ultrasonic Fuel Feeding System(II)-On the Spray Characteristics and Engine Performance," Transactions of KSAE, Vol.2, No.2, pp.50-56, 1994.
- 5) D. S. Choi, "Study on the Atomization Characteristics and the Engine Performance Characteristics of the Ultrasonic Energy Added Diesel Fuel," Ph. D. Dissertation, CNU, 1996.
- 6) S. C. Cho, "Development and the Low Emission Type Fuel Feeding System for Diesel Automobile I (Characteristics and Spray of Emulsified Fuel)," Ilaskorea, Vol.2, No.3, 1997.
- 7) S. C. Cho, M. K. Yoon and J. I. Ryu, "(An) Experimental Study on the Microexplosion Phenomena of Single Droplet Emulsified Fuel," Ph. D. Dissertation, CNU, 2003.
- 8) K. H. Kho, S. J. Lee, B. O. Lee and J. I. Ryu, "A Study on the Flow Characteristics of Emulsified Fuel by the Ultrasonic Energy in Tube," Transaction of KSME, Vol.29, No.11, pp.1248-1256, 2005.