

超音波 에너지 附加 저 점도 바이오디젤 混合燃料의 微粒化 特性에 관한 研究

A Study on the Atomization Characteristics of the Ultrasonic-Energy-Added Low Viscosity Biodiesel Blended Fuel

송용식* · 김용철** · 류정인***

Yongseek Song · Yongcheol Kim · Jungin Ryu

Abstract

This experiment was undertaken to investigate the atomization characteristics of the low viscosity biodiesel blended fuel and ultrasonic energy added one. Test fuels were conventional diesel fuel and biodiesel fuel. We compared to the characteristics of viscosity and surface tension, SMD between low viscosity biodiesel blended fuel and ultrasonic energy added one.

Sauter mean diameter was measured under the variation of the spray distance. Viscosity and surface tension was measured under the variation of the time trace.

To measure the droplet size, we used the Malvern system 2600C. Droplet size distribution was analyzed from the result data of Malvern system. Through this experiment, we found that the condition of the ultrasonic energy added situation had smaller Sauter mean diameter of droplet, viscosity and surface tension than that of the conventional situation.

Key words : Low Viscosity(저점도), Biodiesel Blended Fuel(바이오디젤 혼합연료), Atomization(무화), SMD(사우터 평균 입경), Ultrasonic-Energy(초음파 에너지), BLT(볼트체결형 랑지방 진동자)

1. 서론

바이오 디젤유(BDF, 이하 BDF라 칭함)는 선진국에서는 많은 학자들에 의해 체계적으로 연구되었으며, 현재 일부는 경제적인 양산 단계에서 디젤 차량에 실제 적용하고 있다. BDF는 경유보다 훨씬 높은 고점성 유체로서 열효율이 낮고, 분무 미립화의 불량 및 연료계통의 막힘 등의 문제점이 있다. 이런 문제점을 최소화하기 위해서 완전 연소를 위한 분무 미립화에 기계적, 물리적 방안이 강구될 필요가 있으며 분무미립화 및 엔진 성능향상을 위한 초음파 에너지의 응용이 연구 되어지고 있다.

Niemczewski는 액체에 초음파 에너지를 가하여 공동현상(cavitation)의 강도를 조사하였고, 류정인 등은 초음파를 이용한 경우 연료 무화율이 동일한 공연비에서 25~40% 증가함을 밝혔다.⁽¹⁻⁴⁾ 최 등은 디젤 자동차의 성능 향상을 위한 초음파 분무장치의 사용에서 전 압력 범위에서 분무액적의 SMD가 감소함을 밝혔다.^(5,6) 주 등은 미강유에 초음파 에너지를 부가했을 때 가 상용분사에 비해 액적의 분무 미립화의 개선이 있다고 밝혔다.⁽⁷⁻⁸⁾ 본 연구에서는 폐식용유에서 추출한 BDF와 경유의 혼합 연료에 초음파 에너지를 부가하여 연료성분을 개질한 다음 점도 및 표면장력 실험을 통하여 개방계에서의 물리적 특성을 분석하였으며, 소형 디젤 엔진 분무장치를 이용하여 초음파에 의한 분무 미립화 개선 특성을 규명 하고자 하였다.

* 제천기능대학 카 일렉트로닉스과

** 한국 선급

*** 충남대학교 기계공학부

2. 실험장치 및 방법

2.1 초음파 에너지 부가장치 및 부가방법

Fig. 1은 초음파 연료공급장치의 개략도이며, 초음파 발진장치와 연료에 초음파 에너지를 조사하는 장치로 구성되어 있다.

초음파 발진장치는 크게 발진부, 증폭부, 정합부로 구성되어 있으며, 초음파 에너지 조사장치는 볼트 체결형 랑지방 진동자(BLT)와 혼 및 반사판 등으로 구성되어 있다.

챔버 밑면에는 반사판을 설치하여 연료를 통과한 초음파 및 고온, 고열의 공동들에 의하여 챔버 바닥이 손상되는 것을 방지하였다.

실험에 사용한 진동자는 전기음향 변환 효율이 높고 진동 속도가 빠르면서 발열이 적고 성능과 내구성이 우수한 볼트 체결형 랑지방 진동자(BLT: Bolted Langevin Transducer)이며, 그 주요 특성은 Table 1과 같다.

여기서, 28kHz 주파수를 갖는 진동자를 선택한

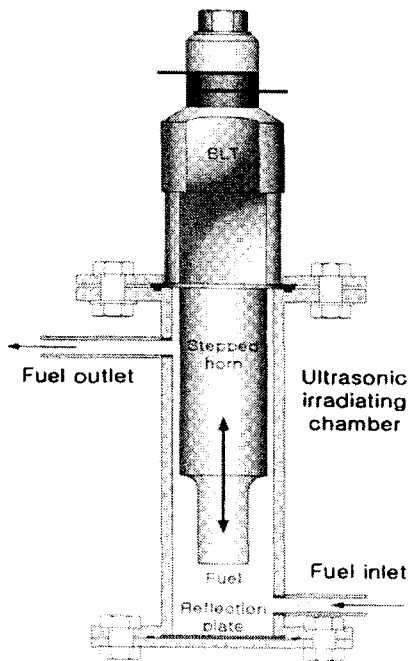


Fig. 1. Schematic diagram of ultrasonic fuel supply system

이유는, 국내에서 생산되는 진동자 중에서는 주파수가 가장 크고 구입하기 쉬우며 가격이 저렴하기 때문이다. 전원 AC 110V로 초음파 발진기를 작동시키면 볼트체결형 랑지방 진동자 및 혼이 28kHz로 진동하면서 연료에 초음파 에너지를 부가하게 되어있다. 연료는 챔버 하단으로 유입되어 상단으로 유출되어진다.

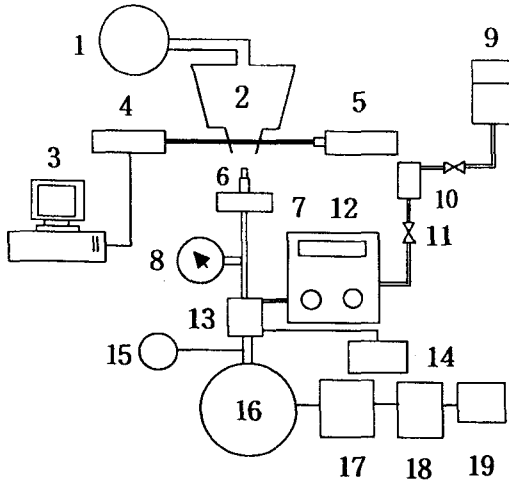
2.2 분무입경 측정장치 및 방법

분무입경 측정장치의 개략도는 Fig. 2와 같으며, 구성은 크게 연료 공급장치부와 분무입경 광학 측정 장치부로 되어 있다.

연료의 분무는 간접 분사식 디젤기관에 사용되는 로터리 방식을 이용하였으며, 연료는 연료 탱크로부터 연료 필터와 연료 분사 펌프 사이에 설치된 초음파 에너지 부가장치에서 초음파 에너지를 받고, 가변형 전기 모터 장치에 의해 분사펌프가 작동되면 연료가 승압된 후 연결된 분사 파이프를 거쳐 분사 노즐에서 연료가 분사되고, 잔여 연료는 리턴 라인을 통하여 연료 탱크로 돌아간다. 회전수는 모터와 펌프 중간축에 설치한 포토 센서에서 발생한 신호를 전자회로를 통하여 측정하였다. 분사 압력과 노즐은 와류실식 연소실에 사용되는 120kg/cm²의 핀틀형을 적용하였고, 연료의 초음파 에너지 부가 시간과 디젤기관의 공회전 속도 및 중속도를 고려하여 750rpm과 1500rpm으로 고정하여 실험하였다. 분사노즐은 X-Y테이블에 설치하여

Table 1 Specifications of bolted Langevin transducer

Frequency (kHz)	28±0.4
Admittance (mΩ)	35±7
Thermal quality (Qm)	1,000
Capacity (pF)	3000±15%
Maximum velocity (cm/s)	60
Maximum altitude(μm)	9.6
Diameter & thickness	φ29.5, 5



- | | |
|---------------------|-------------------------------------|
| 1. Exhaust fan | 11. Valve |
| 2. Spray chamber | 12. Ultrasonic energy adding system |
| 3. Computer | 13. Rotary injection pump |
| 4. Detector | 14. DC 12V battery |
| 5. Laser source | 15. Photo sensor |
| 6. Injection nozzle | 16. Motor |
| 7. X-Y table | 17. Inverter |
| 8. Pressure gauge | 18. Circuit breaker |
| 9. Fuel tank | 19. Power |

Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus

분무실로 분무되도록 하였으며, 분무실은 부유하고 있는 미세한 미립자가 보다 빨리 제거될 수 있도록 배기팬을 설치하였다. 연료의 분무 입경 측정은 분무 입경 광학 측정장치에 의해서 측정되며 그 변수는 다음과 같다.

실험에 사용된 연료는 상용 연료인 경유를 기본으로 하고, 경유에 체적분율로 BDF를 20% 혼합한 혼합 연료를 초음파 에너지를 부가한 경우와 부가하지 않은 경우, 그리고 측정 위치는 보통 디젤 분사노즐에서의 분열길이 (break-up length)가 10~30mm로 보고되고 있으므로 분사 노즐 팁 선단으로부터 40, 60, 80, 100mm 떨어진 곳에서 연료의 분무 입경을 측정하였다. 분무입경의 측정은 한번 측정에 있어 2,000개의 데이터를 샘플링하여 10회 측정

하여 평균한 SMD값으로 채택하였다. 분무 입경 광학 측정장치는 영국 Malvern사의 미립자 해석기 2,600C를 사용하였다. 분무입경 측정에 사용된 광원은 He-Ne 레이저(2mW, $\lambda = 633\text{nm}$)를 사용하였다.

2.4 연료의 물리적 분석장치 및 방법

Fig. 3은 초음파 연료 공급장치의 개략도로서 크게 초음파 에너지 발진장치와 연료에 초음파 에너지를 조사하는 조사장치로 구성되어 있다.

초음파 에너지 발진장치는 크게 발진부, 증폭부, 정합부로 구성되어 있으며, 초음파 에너지 조사장치는 볼트체결형 램지방 진동자 (BLT)와 혼 등으로 이루어져 있다.

전원 AC 110V로 초음파 발진기를 작동시키면 볼트 체결형 램지방 진동자 및 혼이 진동하면서 매스 실린더 내의 연료에 초음파 에너지를 조사하게 된다. 실험에 사용된 연료는 상용연료인 경유를 기본으로 하고, 경유에 체적분율로 BDF를 20% 혼합한 혼합연료이며 시료의 수는 총 18개이며, 이중 16개는 초음파 에너지 조사연료이다. 여기서, 초음파 에너지 조사연료 제조는 개방계에서 16개의 매스 실린더에 약 500cc를 채우고 초음파 조사시간은 각각 0, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480 초로 하였으며, 대기압 상온(20°C)에서 점도와 표면장력을 측정하였다.

점도 측정은 일본의 RION사에서 제작한 직류 6V로 구동되는 스피들 회전식 아날로그 점도계를 사용하였으며, 실험용 컵에 20°C, 500cc의 각 시료를 채워 초음파 에너지를 일정시간 간격으로 가하면서 변화를 측정하였다. 이때 주의할 점은 초음파 에너지를 가한 직후 온도는 상승하므로 초음파 에너지를 가하기 전의 온도와 일치될 때 각 10회 측정하여 평균값을 선택하였다.

표면장력 측정은 장력을 측정하기 위해 슈메이씨 표면장력계(3010 type)를 사용하여 측정하였다. 이 장력계는 규정 실험 시료에 백금 링을 잠기게 한 후 이 링을 끌어 올렸을 때 시료로부터 링이 떨어지는 순간의 값을

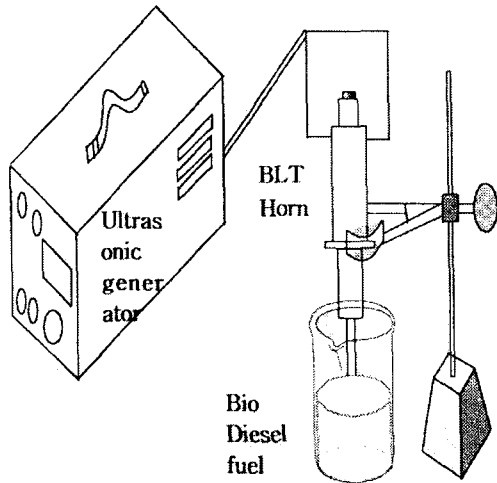


Fig. 3. Ultrasonic energy irradiating system on diesel fuel

측정하여 식(2-1)로 표면장력을 환산하는 방식으로, 10회 측정하여 평균값을 선택하였다.

$$T = \{ W_{max} / 2\pi(r_1 + r_2) \} \quad (2-1)$$

여기에서 T는 표면장력, W_{max} 는 백금링이 액체 표면에서 떨어지는 순간 측정값, r_1 은 백금링의 내반경, r_2 는 백금링의 외반경이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 혼합 연료의 물리적 분석

Fig. 4(a)는 초음파 부가시간에 따른 각각의 혼합연료에 대한 점도를 나타내고, Fig. 4(b)는 초음파를 부가하지 않은 각각의 연료를 기준으로 했을 때 점도의 감소율을 나타낸 것이다. 초음파 에너지 부가의 경우가 부가하지 않은 혼합 연료보다 2~22% 점도 감소 증가율을 보였다.

Fig. 5(a)는 초음파 부가 시간에 따른 각각의 혼합연료에 대한 표면장력을 나타내고, Fig. 5(b)는 초음파를 부가하지 않은 각각의 연료를 기준으로 했을 때 표면장력의 감소율을 나타낸 것이다. 점도 분석과 같이 초음파 에너지 부가의 경우가 부가하지 않은 혼합연료보다 1~3.7%

표면장력 감소 증가율을 보였다.

그 이유는 경유에 함유되어 있는 복잡한 구조인 고리모양의 탄화 수소계가 초음파 에너지를 받으므로서 사슬모양의 탄화 수소계로 바뀌어져서 분자간의 인력이 완화되었기 때문이다.⁽⁹⁾

그리고 초음파 에너지 부가 시간에 따라 일정한 감소율을 나타내지 않고 주기적인 감소율을 나타내고 있는 이유는 각 작용기마다 결합 에너지가 서로 달라 분해되는 시간 차이에서 나타나는 것이다.⁽¹⁰⁾ 혼합연료의 물리적인 특성 변화를 분석함으로써 화학적 특성의 변화를 예측하는 것이 가능하다고 사료된다.

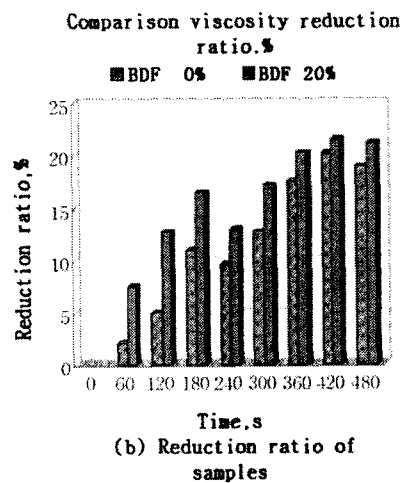
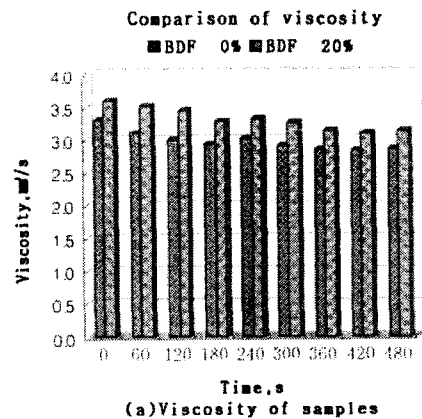


Fig. 4. Viscosity and reduction ratio of samples

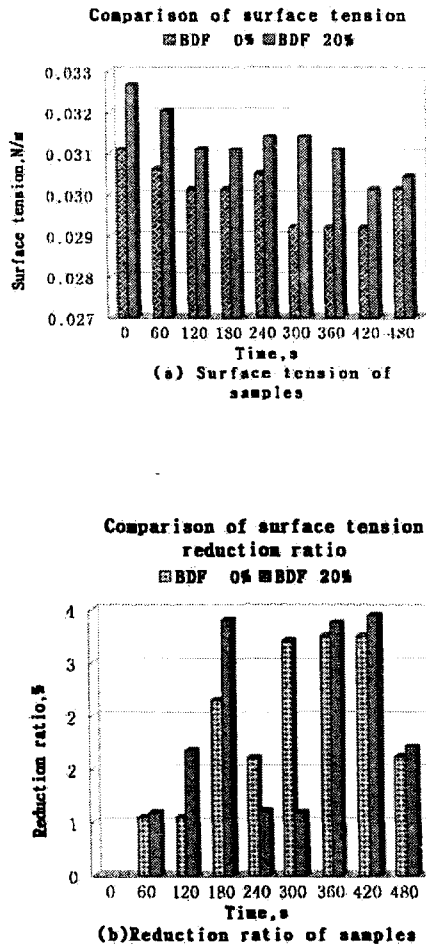


Fig. 5. Surface tension and reduction ratio of samples

3.2 혼합 연료의 분무 입경 분석

Fig. 6과 Fig. 8은 분사 노즐의 분사 압력 120 kg/cm², 펌프 회전수를 750rpm, 1500rpm으로 하였을 때, 분사 노즐 팁 선단으로부터의 거리에 따른 SMD의 변화를 BDF0%, 20%에 초음파 에너지를 부가한 경우와 부가하지 않은 경우에 대하여 나타낸 것이다. BDF 성분이 증가할수록 SMD가 크게 나타나며, 그 이유는 물리적 특성인 점도 및 표면장력의 영향에 의한 것으로 판단된다. 또한, 분사노즐 선단으로부터 거리가 멀어 질수록 SMD는 약간씩 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 그 이유는

분사노즐 선단으로부터 거리가 멀어질수록 관통력이 작아져 다시 액적들이 응집되기 때문이다.

Fig. 7과 Fig. 9는 분사 노즐의 분사압력 120 kg/cm² 펌프 회전수를 750rpm, 1500rpm 조건에서 각각의 연료에 초음파를 부가했을 때 분사노즐 팁 선단으로부터의 거리에 따른

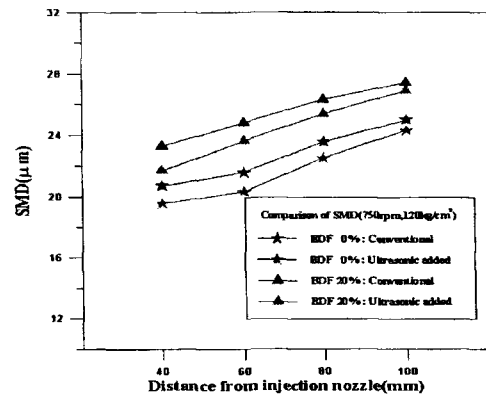


Fig. 6. Comparison of SMD with the type of blended fuel and distance from the injection nozzle (inj. pressure=120kg/cm², pump speed=750rpm)

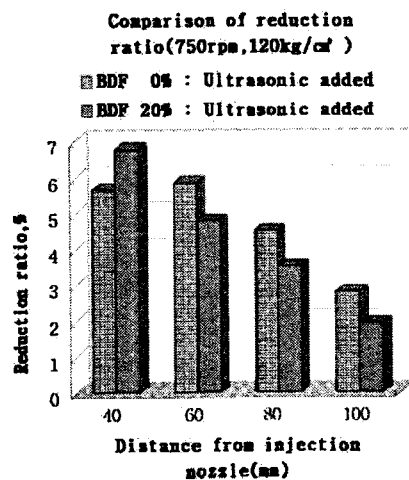


Fig. 7. Comparison of reduction ratio with the type of blended fuel and distance from the injection nozzle (inj. pressure=120kg/cm², pump speed=750rpm)

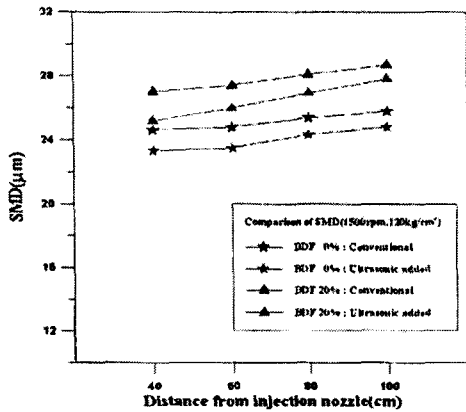


Fig. 8. Comparison of SMD with the type of blended fuel and distance from the injection nozzle (inj. pressure=120kg/cm², pump speed =1500 rpm)

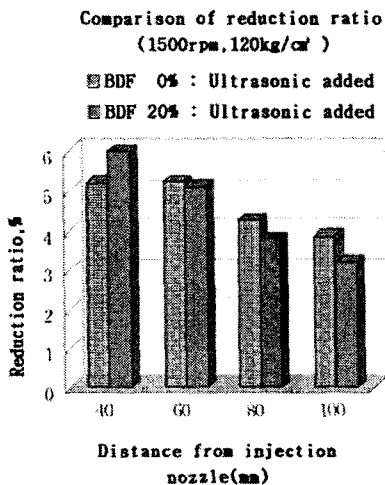


Fig. 9. Comparison of reduction ratio with the type of blended fuel and distance from the injection nozzle (inj. pressure=120 kg/cm², pump speed =1500 rpm)

SMD의 감소율을 나타낸 것이다.

특히, 회전수 변화한 두 조건 모두에서 시료 변화에 상관없이 초음파에너지 조사시 SMD의 감소율이 증가하는 경향을 보였으며, 각각 혼합 연료의 전체 SMD는 5% 감소하였다.

그 이유는 모두 초음파 에너지를 연료에 부가 함으로써 공동현상으로 화학적 변화를 가져와

연료의 분무입경이 작아진 것이다.

일반적으로 동일 분사압력에서 펌프의 회전수 변화에 따라서 SMD와 감소율은 전 영역에서 같은 경향을 보이고 있으나, 1500rpm 에서 SMD가 9~11% 증가함을 알 수 있다. 그 이유는 노즐에서 분사된 직후 분무는 미분열 액주 상태이며 시간 경과에 따라 액주가 분열하여 미립화되는 분열과정을 거치기 때문에 펌프의 회전수가 증가할수록 노즐 선단에서 분사되는 시간이 짧아져 이미 분사된 액적들중에 잔여액 적과의 응집에 의한 영향으로 연료의 점도 및 표면장력 증가 때문에 SMD가 증가한 것으로 판단된다.

4. 결론

순수 경유와 BDF 혼합 연료를 사용하여 초음파 에너지 부가 조건에 따른 물리적 특성과 연료분사 입경을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

- 1) BDF(0%, 20%) 연료의 초음파 부가시 점도 감소율은 3~27%를 보였다.
- 2) BDF(0%, 20%, 40%, 100%) 연료의 초음파 부가시 표면장력 감소율은 1~7%를 보였다.
- 3) 압력 120kg/cm² (750rpm, 1500rpm)의 초음파 부가시 측정 거리에 따른 각 혼합연료 SMD감소율은 5%를 보였다.
- 4) 동일 분사압력에서 펌프 회전수가 1500 rpm 으로 높아지면 SMD가 9~11% 증가했다.

References

- 1) Niemczewski, B., "A comparison of Ultrasonic cavitation intensity in Liquids," Ultrasonics, May pp. 107-110, 1980.
- 2) Goering, C. E., et al., "Fuel Properties of eleven Vegetable oils," Transactions of the ASAE, 25(6) pp. 1472-1483, 1982.
- 3) J. I. Ryu, "A Study on the Performance of the Intake Fuel Atomization by Ultrasonic," Transactions of the Industrial Technology Institute, Chungnam Univ., Vol. 2, No. 1, pp. 46-54, 1987.

- 4) M. J. Jung, K. S. Cho, J. I. Ryu, "A Study on the Combustion of Low Grade Fuel Oil in Diesel Engine," Spring Conference Proceeding of KSAE, Vol. 1, pp. 149-154, 1992.
- 5) D. S. Choi, J. I. Ryu, O. Y. Yang, "A Study on the Performance Improvement of the Ultrasonic Fuel Supply Device Type Gasoline Automobile(I)," Transactions of the Industrial Technology Institute, Chungnam Univ., Vol. 7, No. 2, pp. 79-86, 1992.
- 6) M. K. Yoon, Y. G. Choi, S. G. Baek, J. I. Ryu, "A Study on Characteristics of the Spray for the Mixed BC Oil " Fall Conference Proceeding of KSAE, Vol. 1, pp. 291-296, 1996.
- 7) E. S. Ju, S. Y. Jeong, D. W. Kang, J. C. Kim, "A Study on the Atomization of a Highly Viscous Biodiesel Oil," Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 5, No. 1, pp. 146-153, 1997.
- 8) E. S. Ju, M. G. Song, W. C. Choi, Y. H. Park, "A Study on Characteristics of the Liquid Atomization by Ultrasonic," Fall Conference Proceeding of KSAE, Vol. 1, pp. 21-26, 1998.
- 9) B. O. Lee, J. I. Ryu, "A Study on Correlation of Higher Heating Value and Cetane Number of Reformed Diesel Fuels by Ultrasonic Energy Irradiation," International Journal of Automotive Technology, (in submitted), 2002.
- 10) B. O. Lee, Y. S. Song, J. I. Ryu, "Effects of the Ultrasonic Energy on Smoke Reduction of Diesel Engine," Spring Conference Proceeding of KSAE, Vol. 1, pp. 222-227, 2003.