

초음파에너지가 간접분사식 디젤기관 성능에 미치는 영향

이병오* · 김용국** · 이승진***

*한국전력공사, **충남대학교 기계공학과, ***ANT21
(2009년 7월 23일 접수, 2009년 10월 7일 수정, 2009년 10월 7일 채택)

Effects of the Ultrasonic Energy on the IDI Diesel Engine Performance

Byoung-oh Lee*, Yong-guk Kim**, Seung-jin Lee***

**Overseas Nuclear Projects Department, Korea Electric Power Corporation*

***Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam National University*

****Dept. of R&D Center, ANT21*

(Received 23 July 2009, Revised 7 October 2009, Accepted 7 October 2009)

요 약

본 연구에서는 수송용 경유를 연료로 사용하고 있는 간접분사식 디젤기관에 있어서 연료에 초음파 에너지를 조사하였을 때의 기관성능 및 배출물질 특성 변화에 대해 조사하였다. 실험은 경유에 초음파 에너지를 조사한 연료와 상용 경유를 간접분사식 디젤기관에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 본 운전조건하에서, 초음파 에너지를 조사한 경유로 디젤기관을 운전하였을 경우, 상용 경유 운전 시에 비해 지압선도, 열발생율 및 출력이 상승하고 질량연소율이 단축되었으며 제동연료소비율과 매연은 감소하였다. 또한, 보다 안정화되면서 완전한 연소가 이루어졌으며 질소산화물은 증가하였다.

주요어 : 초음파에너지, 개질연료, 기관성능, 배출물질

Abstract — In the study, the effect of the ultrasonic energy in transportational diesel fuel on the engine performance and exhaust emission has been investigated for indirect injection diesel engine. It was tested to estimated change of engine performance and exhaust emission characteristics for the transportational diesel fuels and the reforming fuels which was irradiated by the ultrasonic energy. The results of the study may be concluded as follows; By the irradiation of ultrasonic energy on the diesel fuel, cylinder pressure, heat release rate and engine power were increased but bsfc, mass fraction burned, and smoke were reduced. Also, the combustion was more stabilized and became complete and NOx was increased.

Key words : Ultrasonic Energy, Reforming Fuel, Engine Performance, Exhaust Emission

1. 서 론

오늘날 전 세계적으로 수송용, 산업용 차량의 주 동력원으로 널리 사용되고 있는 디젤기관은 가솔린기관에 비해 연료의 경제성과 우수한 출력성능 및 지구 온난화

의 주원인으로 불리는 이산화탄소의 배출량도 적다. 그러나 질소산화물, 입자상 물질 등의 대기배출물이 대량 배출되기 때문에 엄격한 환경규제를 만족하기 위해서는 유해 배출물질을 더욱더 감소시켜야 한다. 국내 디젤 차량의 경우 선진국에 비해 보유비율이 높고 일일주행거리가 길며, 과적, 과속, 급가감속 및 과속 등의 운전조건이 가혹하여 매연 등의 입자상 물질 배출이 많아 시각적으로 불쾌할 뿐만 아니라 알데히드와 같은 악취물질까지 배출하고 있어 뒤따르고 있는 차량 운전자에게 불쾌한 냄새는 물론 고통까지 느끼게 하고 있다. 특히 국내

†To whom corresponding should be addressed.
Overseas Nuclear Projects Department, KEPCO, 411,
Yeongdongdaero, Gangnam-gu, Seoul 135-791, Korea
E-mail: lboosh@hanmail.net

대도시지역 특성상 인구가 밀집되어 있고, 차량정체 시간이 길며, 도로주변과 거주지역의 이격 간격이 짧고, 대형버스 및 트럭 등 디젤차량의 운행이 빈번하여 사람들이 느끼는 체감 오염도는 더욱 높은 실정이다.¹⁾

이처럼 심각한 디젤기관 유해배출물질을 줄이기 위한 방안으로 합산소 연료와 같은 대체연료내지 연료성상의 개선 등과 같은 연료의 전처리기술에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다.^{2, 3, 4)}

이중 연료성상의 개선에 의한 연료 전처리기술의 일환으로 연료에 초음파 에너지를 조사하여 연료를 개질시키는 방법은 합산소 연료나 대체연료 등과 같은 다른 연료 전처리기술, 기관관련기술 및 배출물질 후처리기술과 비교해 볼 때, 경제작시간적 측면을 고려해 보면 운행차량을 포함하여 대기환경개선효과가 우수하다고 판단되어, 활발한 연구가 진행되고 있다.^{3, 4, 5)}

하지만 공동현상, 방사압, 지향성 등과 같은 초음파 여러 인자들에 의한 연료성상 변화로 인해 기관성능에 미치는 초음파의 영향은 매우 복잡하다.³⁾

따라서 본 연구에서는 상용 간접분사식 디젤기관의 연료탱크와 연료분사펌프 사이에 초음파 에너지 조사장치를 설치하여, 초음파 에너지를 조사한 연료와 상용 경우로 기관운전 시 기관성능 및 배출특성을 조사하여 디젤기관 제 성능에 미치는 초음파의 영향을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 초음파 에너지 조사장치

Fig. 1은 초음파 에너지 조사장치의 개략도로서, 연료에 공동현상이 극대화될 수 있도록 볼트체결형 랑지방 진동자(BLT), 혼 및 반사판 등으로 구성되어 있다.

전원 AC 110V로 초음파 발전기(200W)를 작동시키면 볼트체결형 랑지방 진동자는 28kHz로 진동하면서 혼을 통하여 조사장치 하단에서 유입되고 상단을 통하여 유출되는 연료에 초음파에너지를 조사하게 된다.

초음파 에너지 조사장치 바닥에는 반사판을 설치하여, 연료를 통과하면서 발생이 된 초음파 에너지에 의한 고온고열의 초음파 공동들의 폭발 시 조사장치 바닥이 손상되는 것을 방지하였을 뿐만 아니라 음의 전반사 조건이 가능하도록 하여 초음파 에너지 효율을 극대화시켰다.

또한, 초음파 에너지 조사장치의 용량을 30ml로 설정하였는데, 이는 초음파 에너지 조사장치 내부에서 진폭 확대자인 혼이 차지하는 공간을 제외한 영역으로 주파수 28kHz의 진동자에 맞추어 혼을 반파장으로 설계할 시 최적의 초음파 에너지가 조사되도록 진동자와 반사판과의 거리를 고려한 것이다.

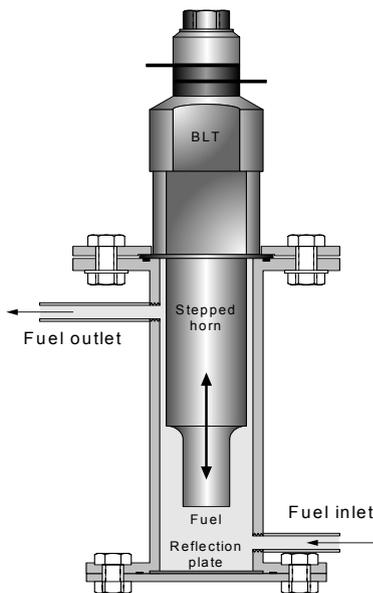
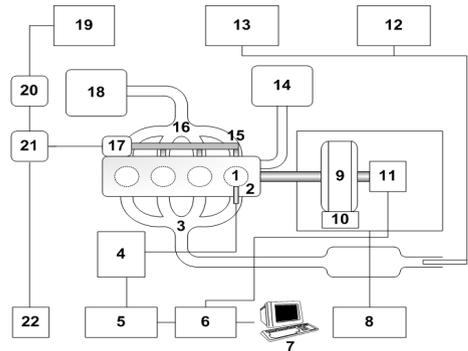


Fig. 1. Schematic diagram of ultrasonic energy irradiation system.



1. Engine (4th cylinder)
2. Pressure transducer
3. Exhaust manifold
4. Charge Amplifier
5. Oscilloscope
6. A/D converter
7. PC
8. Dynamometer controller
9. Dynamometer
10. Load cell
11. Rotary encoder
12. NOx tester
13. Smoke tester
14. Cooling water tank
15. Injection nozzle
16. Intake manifold
17. Injection pump
18. Air surge tank
19. Fuel tank
20. Fuel flowmeter
21. Ultrasonic energy irradiation system
22. Ultrasonic generator system

Fig. 2. Schematic diagram of test engine equipment.

2-2. 기관성능 실험장치

Fig. 2는 초음파 에너지 조사장치를 부착한 기관성능 실험장치의 전체적인 개략도로서, 주요 구성은 실험용 기관, 동력계, 측정장치, 데이터 획득장치로 이루어져 있다. 실험용 기관의 주요사양은 Table 1과 같다.

실험에 사용된 동력계는 맥동하는 자장의 저항을 제 동력으로 변환시키는 방식인 수냉식 와전류 동력계 (Hwanwoong Co, type 130W)를 사용하였다.

2-3. 기관성능 실험방법 및 데이터 측정방법

기관성능 실험은 기관의 회전속도를 고정시킨 후에 엔진부하를 가변시키는 정속도 모드방법을 사용하였다. 예비실험을 통하여 가장 많이 운전되고 있는 경제출력 범위이며 제동연료소비율이 가장 양호한 기관 회전속도 2,000rpm에서 상용 경우 기관운전 시의 최대 토크를 기준으로 하여 상용 경우, 초음파 에너지를 조사한 경우 모두 부하율 25%, 50%, 75% 및 100%로 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

연소실 압력을 측정하기 위해 4번 실린더 연소실 헤드에 어댑터를 가공하여 부착하였으며 그 위에 피에조 전기 압력 변환기를 연결하고 데이터 획득장치를 이용하여 연소실 압력 측정을 크랭크 각도 1° 마다 압력 신호를 받아들여 50사이클 동안 수집양상별 평균값을 구하였다.

연료소비율은 1분간 기관에 공급된 연료의 부피를 디지털 체적 유량계 및 전기 타이머로 이루어진 연료 유량계를 이용하여 3회 반복하여 측정한 평균값을 질량으로 환산하여 계산하였다.

NOx는 이탈리아 Eurotron의 Greeline II 배기가스

Table 1. Specification of test engine

Items	Specifications
Engine type	Water Cooled 4 Stroke 4 Cylinder IDI Diesel Engine
Bore×Stroke	91.1 × 95 mm
Displacement	2,476 cc
Compression ratio	21:1
Combustion chamber type	Swirl Chamber
Maximum power	77ps/4,200rpm
Maximum torque	15.5kgf/2,000rpm
Injection timing	ATDC 4°
Coolant temperature	80±2 °C

측정장치로, 매연은 여지반사식 디지털 매연측정장치 ((주) 수광정밀)를 이용하여 3회 반복 측정하여 평균값을 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 지압선도, 열발생율 및 질량연소율에 대한 초음파 영향

Fig. 3은 기관회전속도 2,000rpm 부하율 75%일 때 상용 경우 및 초음파 에너지 조사 경우로 운전하였 때의 지압선도, 열발생율 및 질량연소율을 나타낸 것이다.

그림을 보면 알 수 있듯이 상용 경우로 운전한 경우에 비해 초음파 에너지 조사 경우로 운전한 것이 보다 연소 성능이 우수함을 나타내고 있다. 지압선도 및 열발생율의 경우, 압축행정과정인 상사점(TDC)까지는 상용 경우나 초음파 에너지 조사 경우 모두 연소실내의 압력과 열발생율은 거의 유사하나, 상사점 이후부터는 상용 경우에 비해 초음파 에너지 조사 경우의 연소실내 최고압력을 포함하여 연소실내 압력 및 열발생율이 보다 높게 나타나는 것을 볼 수 있다.

질량연소율의 경우에도 초음파 에너지 조사 경우가 상용 경우로 기관운전 시에 비해 연소시작점을 포함하

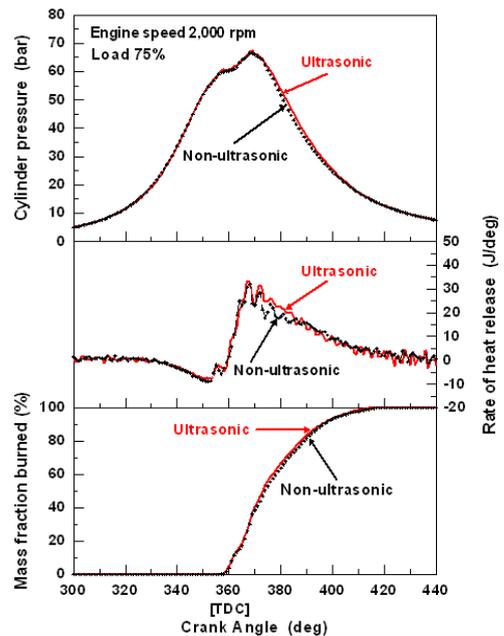


Fig. 3. Comparison of cylinder pressure, heat release rate and mass fraction burned under the engine speed 2,000rpm and load 75%.

여 화염핵이 생성되는 0 ~ 10% 구간의 연소율이 일찍 시작되고 주연소기간인 90% 구간까지 연소기율기가 가파르고 연소종료가 일찍 나타나는 등 전체적으로 연소속도와 같은 성능이 개선되는 경향을 보이고 있다.

이러한 원인은 연료에 초음파 에너지 조사시 공동현상, 방사압, 지향성 및 직진류 등과 같은 초음파 주요 지배인자들의 영향으로 인해 분사된 연료의 평균분무입경이 작아지고⁵⁾ 분무각이 커졌을 뿐만 아니라 세탄가 증가와 같은 분자구조 변화에 따른 착화성 향상^{2, 3)}으로 착화 지연이 단축되어 연소가 빨리 시작되고 활발히 이루어져 연소실내 최고압력이 상승하고 연소도 일찍 종료된 것으로 판단할 수 있다.

3-2. 연소안정성에 대한 초음파 영향

일반적으로 기관의 연소안정성을 분석하기 위한 정량적인 방법으로 연소실 최고압력과 같은 연소상태의 사이클당(매 연소당) 변동폭에 대해 표준편차와 평균값의 비율로 사이클 변화 정도를 정량화한 사이클 변동계수(COV : Coefficient of variation)가 이용된다.⁶⁾

사이클 변동계수가 작으면 기관의 운전상태가 안정함을 의미하고 변동계수가 크면 기관의 운전상태가 불안정함을 의미하는 것으로써, 기관의 사이클 변동이 심한 경우 연료소비율과 기관 출력은 물론 유해 배출물질 특성에도 악 영향을 미친다.^{4, 7)} 통상의 기관에 있어서 사이클 변동계수는 보통 연소안정한계범위를 6% 이내로 잡고 있다.⁴⁾

Fig. 4는 기관회전속도 2,000rpm에서 부하율 변화에 대해 연소실 최고압력에서 각 기관부하에 대해 50사이클 분의 지압선도를 이용하여 구한 상용 경우와 초음파 에너지를 조사한 경우의 사이클 변동계수를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이, 상용 경우에 비해 초음파

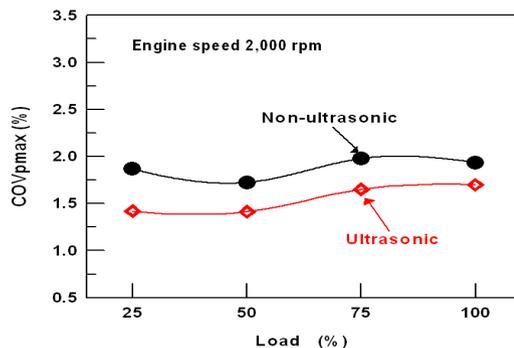


Fig. 4. Comparison of COVpmax under varying load at engine speed 2,000rpm.

에너지 조사 경우의 경우가 연소실 최고압력의 표준편차가 감소하여 연소변동이 최소 12.2%, 최대 24% 작아지는 경향을 보여서 연소가 보다 안정하다는 것을 알 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 초음파 에너지 효과로 인해 착화성이 향상되고 연소속도가 빨라지는 등 전반적으로 연소개선이 이루어짐^{2, 3)}으로 인해 비록 연소실 최고압력이 상용 경우에 비해 상승은 하였지만 압력상승의 표준편차는 감소하여 연소가 보다 안정화된 것으로 판단된다.

3-3. 기관출력 및 제동연료소비율에 대한 초음파 영향

Fig. 5는 기관회전속도 2,000rpm, 각 부하율에서 상용 경우와 초음파 에너지 조사 경우로 운전하였을 때의 기관출력을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이, 초음파 에너지 조사 경우로 운전한 경우가 상용 경우로 운전한 경우에 비해 기관출력이 대략 1.2~4.3% 정도 향상됨을 알 수 있다. 일반적으로 오차범위를 ±5%내외로 볼 때, 기관출력을 포함하

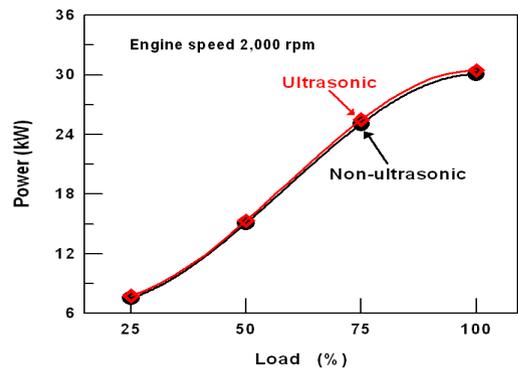


Fig. 5. Comparison of engine power under varying load at engine speed 2,000rpm.

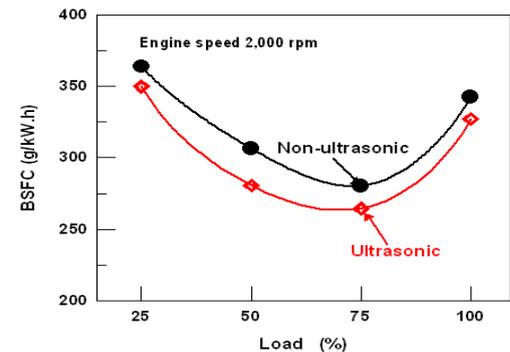


Fig. 6. Comparison of brake specific fuel consumption(bsfc) under varying load at engine speed 2,000rpm.

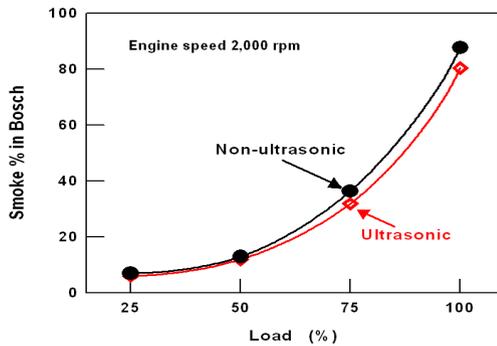


Fig. 7. Comparison of Smoke under varying load at engine speed 2,000rpm.

여 후술한 일부 그래프의 경우에도 오차 범위에 들어있을 정도로 미약하지만, 예비실험과 참고문헌^{3, 5)}을 종합 검토한 결과, 이것 역시 초음파 지배인자들의 영향에 의한 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 6은 기관회전속도 2,000rpm, 각 부하율에서 상용 경유와 초음파 에너지 조사 경유로 운전하였을 때의 제동연료소비율을 나타낸 것이다.

상용 경유나 초음파 에너지 조사 경유로 운전한 모든 조건에서 일반적인 제동연료소비율의 일반적인 경향을 보이고 있으며, 초음파 에너지 조사 경유로 운전한 경우가 상용 경유로 운전한 경우에 비해 3.9 ~ 8.5% 개선되었다. 그 이유는 앞에서 기술한 바와 같이 초음파 에너지 조사에 의해 기관출력이 증가하고 연소가 보다 안정화되었기 때문으로 판단된다.

3-4. 매연 및 질소산화물에 대한 초음파 영향

Fig. 7은 부하변화에 대한 상용 경유와 초음파 에너지를 조사한 경유로 기관운전시의 매연농도의 배출특성을 나타낸 것이다.

그래프에서 보는 바와 같이, 상용 경유와 초음파 에너지를 조사한 경우 모두 저부하에 비해 고부하로 갈수록 매연 배출량이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 불균일 혼합으로 인해 공기 이용률이 낮은 확산 연소인 디젤기관의 연소특성상, 저부하영역에 비해 고부하영역이 상대적으로 공기이용률이 불충분할 뿐만 아니라, 공급되는 연료분사량도 많아졌기 때문으로 판단할 수 있다.

또한, 상용 경유 운전 시에 비해 초음파 에너지 조사 경유로 운전한 경우 매연농도가 최소 7.8%, 최대 14.3% 감소하였는데, 이것은 앞에서 설명한 바와 같이, 연료에 초음파 에너지를 조사함에 따라 공동현상, 지향성 및 방사압 등과 같은 초음파 지배인자들의 영향으로 점도 및

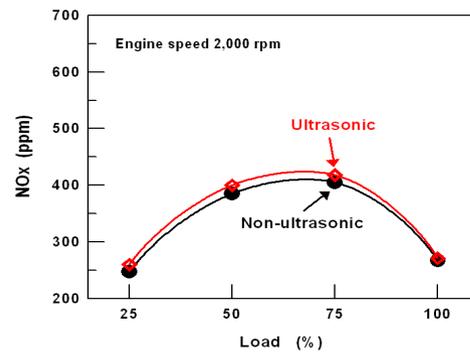


Fig. 8. Comparison of NOx under varying load at engine speed 2,000rpm.

표면장력이 작아지고 분사된 연료의 분무입경이 감소⁵⁾하여 상대적으로 쉽게 증발되었을 뿐만 아니라 이소파라핀의 노멀파라핀으로의 변환과 방향족 성분의 지방족 성분으로의 전환 등과 같은 분자구조 변화에 따른 착화성 향상^{2, 3)}으로 인해 공기와의 혼합이 충분히 이루어져 연료가 분해온도에 도달할 때 보다 충분히 산소와 결합함으로 인해 매연농도가 저감된 것으로 판단된다.

Fig. 8은 기관회전속도 2,000rpm에서 부하변화에 따른 상용 경유와 초음파 에너지를 조사한 경유로 기관운전시의 질소산화물 배출특성을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 시판경유 및 초음파 에너지를 조사한 경우 모두 75% 부하지점에서 질소산화물 배출이 최대로 나타났으며, 상용 경유 운전 시에 비해 초음파 에너지를 조사한 경우 운전의 경우 질소산화물이 부하율 변화 시 최소 1.5%, 최대 5.3% 증가하였다.

이것 역시 3-1절에서 설명한 바와 같이 초음파 에너지 조사 시 연료내의 국부적인 온도상승에 의한 열발생을 증가와 국부적 압력상승에 따른 난류발생으로 인한 연소율 상승이 증대되어 기관 연소실의 온도가 상승하여 질소산화물이 보다 많이 생성되었다고 사료된다.⁸⁾

따라서, 초음파 에너지를 조사한 연료로 기관운전 시 질소산화물 저감을 위해서는 기관출력이 저하되거나 매연이 증가하지 않는 범위내에서 배기재순환 내지 분사 시기 지연과 같은 후처리 방식 등이 병행되어야 한다.

4. 결 론

초음파 에너지를 조사한 연료로 간접분사식 디젤기관 운전 시 기관성능 및 배출특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초음파 에너지를 조사한 연료로 운전한 경우 연소 실내 최고압력, 열발생율 및 질량 연소율, 연소안정성 등을 포함하여 상용 경유에 비해 연소성능이 향상되었다.
- 2) 초음파 에너지 조사 경유가 상용 경유에 비해 기관 출력이 1.2~4.3% 향상되고 제동연료소비율이 3.9~8.5% 저감되었다.
- 3) 상용 경유로 운전한 경우에 비해 초음파 에너지를 조사한 경유로 운전한 경우 매연은 7.8~14.3% 감소하였으나, 질소산화물은 1.5~5.3% 증가하였다.

이상의 실험을 통하여 초음파 에너지를 조사한 연료로 기관운전 시 질소산화물 저감을 위해 배기재순환 내지 분사시기 지연과 같은 후처리 방식 등이 병행되어야 함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 박경석, 한성철: "LPG 자동차 동향", 한국자동차공학회지 24-5, pp.37~49 (2002).
2. 이병오, 류정인: "초음파 개질 경유의 연료특성과 연소특성의 상관관계에 관한 연구 (II) -화학구조와 세탄가의 상관성-", 한국자동차공학회논문집, 11-1, pp.64~71 (2003).
3. 이병오: "초음파 개질 연료의 디젤기관 계 성능에 관한 연구", 충남대학교 대학원 박사학위논문 (2004).
4. 이영재외 6인: "압축점화기관용 복합연료 기술개발 연구 (IV)", 한국에너지기술연구원 연구보고서 (1996).
5. 최두석: "초음파 에너지 부가 디젤유의 분무특성과 기관 성능특성에 관한 연구", 충남대학교 대학원 박사학위논문 (1996).
6. D. R. Lancaster, R. B. Krieger and J. H. Lienesch: "Measurement analysis of Engine Pressure Data", SAE Paper No. 750026 (1975).
7. 이창식, 이기행, 서영호: "MPI 엔진용 공기보조 인젝터의 분무 미립화 및 연소 특성에 관한 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, SAE No. 96380253 (1996).
8. B. E. Noltink and E. A. Neppiras: "Cavitation produced by ultrasonic : theoretical conditions for the onset of cavitation", Proc. Phys. Soc., 64B 1032 (1951).