

디젤기관의 매연저감에 미치는 초음파 영향

이 병 오^{*1)} · 김 용 국²⁾

한국전력공사 전력연구원¹⁾ · 충남대학교 기계공학과²⁾

Effects of the Smoke Reduction of Diesel Engine Operated with Ultrasonically Reformed Fuel

Byoungoh Lee ^{*1)} · Yongguk Kim ²⁾

¹⁾KEPCO Research Institute, 65 Munjiro, Yuseong-gu, Daejeon 305-760, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received 24 July 2009 / Accepted 18 November 2009)

Abstract : In this paper, the effect of the ultrasonic energy on the diesel engine's smoke reduction has been investigated for indirect injection diesel engine. The smoke concentration of the ultrasonically reformed diesel fuel was reduced remarkably in comparison with conventional diesel fuel. And in-cylinder pressure, heat release rate and mass fraction burned was improved but combustion duration was decreased. However, The combustion durations and the smoke concentrations of both diesel fuels were proportional to the increases of engine loads. Also, When the combustion duration has been increasing, the smoke emission has been augmenting in the shape of the exponential functions.

Key words : Ultrasonically reformed fuel(초음파 개질 연료), Indirect injection diesel engine(간접분사식 디젤기관), Combustion characteristics(연소특성), Combustion duration(연소기간), Smoke concentration(매연농도)

1. 서 론

가채연수가 40여년인 석유의 유한성과 더불어 석유수출국기구의 고유가 정책, 개발도상국 수요증대 등으로 기인된 고유가 시대의 고착화로 전 세계적으로 에너지 절약에 대한 목소리가 높아지고 있다.

또한, 보일러나 내연기관 등에서 배출되는 유해물질로 인해 대기오염에 대한 우려가 높아지면서 환경문제가 민관의 최대 관심사로 자리매김했다.

특히, 국내 대도시 지역 특성상 인구가 밀집되어 있고 차량정체 시간이 길며, 도로변과 거주지간의 짧은 이동거리와 대형버스, 트럭 및 디젤승용차 등 경유 차량의 빈번한 운행으로 시민들이 느끼는 체감 오염도는 보다 심각하여 이에 대한 현실적인 대

책마련이 더욱 시급한 실정이다.

디젤기관의 유해 배출물질 중 시계를 흐리고 호흡기 폐렴을 유발시킬 수 있는 매연은 생성과 성장에 있어 연료성상의 영향을 상당히 받는다.^{1,2)}

내연기관의 유해 배출물질 저감기술 중 전처리 기술에 해당하는 연료성상 개선은 기관관련 기술이나 후처리 기술 및 대체연료와 같은 다른 전처리 기술 등과 비교해 볼 때, 현실적인 경제성을 고려한 단기간내의 대기환경개선측면에서 신규제작차량과 운행중인 차량 모두에게 유리하여 선진국에서는 석유-자동차 양 업계의 공동연구라든지, 각 연구기관에서 경유의 품질개선이 내연기관의 배출가스 저감에 미치는 영향에 대해 활발한 연구가 이루어지고 있다.^{3,4)}

이에 본 연구에서는 연료에 초음파에너지를 조사

*Corresponding author, E-mail: lbo ssh@kepri.re.kr

하여 개질시킨 다음, 이 개질된 연료를 디젤기관에 적용하였을 시, 매연저감에 미치는 영향을 조사하여 초음파에너지가 디젤기관의 매연저감에 탁월한 효과가 있음을 검증하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 초음파 연료공급장치

Fig. 1은 초음파 연료공급장치의 개략도로서 크게 초음파 발진장치와 연료에 초음파에너지를 부가하는 조사장치로 구성되어 있다.

초음파 발진장치는 초음파 진동자에 전기신호를 가하여 기계적 진동신호로서 초음파 출력을 내는 장치로서 고주파를 발진하여 증폭부에 가해주는 발진부, 발진된 주파수로 진동자를 구동시킬 수 있는 전력으로 증폭해 주는 증폭부, 증폭된 구형파를 사인파로 바꾸어 임피던스를 정합하여 진동자에 가해주는 정합부로 구성되어 있다.

초음파에너지 조사장치는 연료의 개질이 극대화될 수 있는 구조로서 볼트체결형 랑지방 진동자(BLT;bolted Langevin Transducer), 혼 및 반사판 등으로 구성되어 있다. 전원 AC 110V로 초음파 발진기(200W)를 작동시키면 BLT는 28kHz로 진동하면서

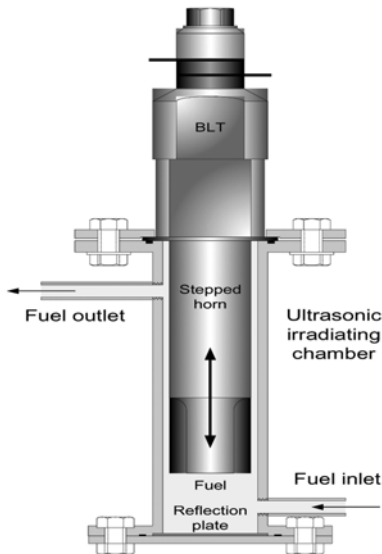


Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic fuel supply system

혼을 통하여 연료에 초음파에너지를 전달하는 구조로 되어 있다. 연료는 챔버 하단으로 유입된 후 상단을 통하여 유출될 때까지 초음파에너지를 흡수하면서 공동현상, 방사압, 지향성 등과 같은 초음파 주요인자들의 영향에 의해 실험결과 및 고찰에서 언급한 바와 같이 연료의 물리적·화학적 특성이 변하는 등 연료가 개질된다.

챔버 밑면에는 반사판을 설치하였는데 이것은 연료를 통과하면서 발생된 고온·고열의 초음파 공동들에 의한 챔버바닥 손상 방지와 음의 전반사 조건을 가능하게 함으로써 초음파에너지의 효율을 극대화시켰다.

또한 초음파 연료공급장치의 챔버용량을 30ml로 설정하였는데 이는 초음파 연료공급장치의 챔버내에서 진폭확대자인 혼이 차지하는 공간을 제외한 영역으로 주파수 28kHz의 진동자에 맞추어 진폭확대자인 혼을 반파장으로 설계할 시 최적의 초음파에너지 조사에 의한 연료 개질이 이루어질 수 있도록 진동자와 반사판과의 거리를 고려하여 설계한 것이다.

2.1.2 기관성능 실험장치

Fig. 2는 초음파 연료공급장치를 부착한 기관성능 실험장치의 전체적인 개략도로서, 주요 구성은 실험용 기관, 동력계, 측정장치, 데이터 획득장치로 이루어져 있다. 실험용 기관은 수냉식 와류연소실 타입의 4행정 4실린더 간접분사식 디젤기관(1995년식 RV용)으로 주요사양은 Table 1과 같다.

기관의 부하조정 및 동력을 측정하기 위하여 사용된 동력계는 맥동하는 자장의 저항을 제동력으로 변환시키는 방식인 수냉식 와전류 동력계(Hwanwoong Co, type 130W)를 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 기관성능 실험방법

기관성능 실험에서는 정속도 모드로 기관의 회전속도를 고정시킨 후에 엔진부하를 가변시키는 방법을 사용하였다. 예비실험을 통하여 본 기관의 제동 연료소비율이 가장 양호한 2,500rpm과 그 전후 2,000rpm 및 3,000rpm에 대하여, 기관부하율을 상용 연료 사용시의 최대 토크를 기준으로 하여 상용 연

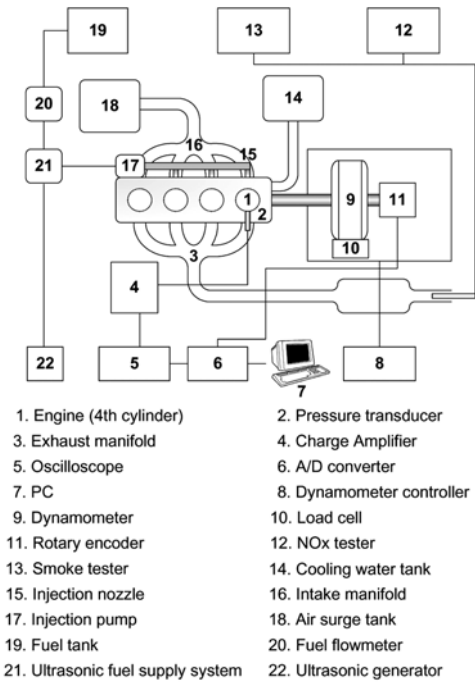


Fig. 2 Schematic diagram of test engine equipment

Table 1 Specification of test engine

Items	Specifications
Engine type	Water cooled 4 stroke 4 cylinder IDI 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

료, 초음파 개질 연료 모두 25%, 50%, 75% 및 100%로 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

2.2.2 데이터 측정방법

일반적으로 매연은 연소기간과 밀접한 관계가 있음을 감안하여 연소기간을 결정하기 위하여 연소실 압력을 측정하였다.

연소실 압력을 측정하기 위해 4번 실린더 연소실 헤드에 어댑터를 가공하여 부착하였으며 그 위에 피에조 전기 압력 변환기(Kistler Co, type 6051B)를

연결하였다.

연소실내 압력은 압력 변환기로부터의 신호를 전하 증폭기(Kistler Co, type 5011B)로 증폭시킨 후 A/D 변환기와 데이터 획득장치를 이용하여 획득하였다.

상사점과 크랭크 각도는 동력계 측에 설치된 로터리 엔코더(Omron Co, type E6B2-CWZ3E)를 이용하여 측정하였는데, 2종류의 펄스 즉, 1회전 당 360개의 펄스(A pulse)는 크랭크 각도, 1회전 당 1개의 펄스(Z pulse)는 1번 실린더의 상사점에 일치시킨 후 이를 기관 사이클의 시작점으로 사용하고 연소실 압력 측정을 크랭크 각도 1° 마다 압력 신호를 받아들이며 50사이클 동안 수집·양상불평균을 취하여 데이터 획득장치로 처리하였다.

기관 회전수는 동력계 측에 부착된 타이밍 디텍터와 연결된 디지털 타코미터 및 디지털 지시계로, 토크는 동력계에 설치된 로드 셀 및 디지털 지시계로 측정된 다음 PC 및 데이터 획득장치로 처리하였다.

매연은 여과지 반사식 디지털 매연측정장치((주)수광정밀, type Gold 707)를 이용하여 3회 반복 측정하여 평균값을 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 지압선도, 열발생율 및 질량연소율에 대한 초음파 영향

Fig. 3, Fig. 4, 및 Fig. 5는 일반적으로 가장 많이 운전되는 기관회전속도 2,000rpm, 2,500rpm, 3,000rpm에서 부하율 75%일 때 상용 연료 및 초음파 개질 연료에 대한 지압선도, 열발생율 및 질량연소율을 나타낸 것이다.

지압선도 및 열발생율의 경우, 크랭크 각도 300°에서 상사점까지는 압축과정으로 상용 연료나 초음파 개질 연료 모두 연소실내의 압력 및 열발생율은 거의 유사하나 상사점 이후에는 초음파 개질 연료가 상용 연료에 비해 연소실내 최고압력을 포함하여 연소실내 압력 및 열발생율이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다.

질량연소율의 경우에도 초음파 개질 연료가 상용 연료에 비해 연소시작점을 포함하여 화염핵이

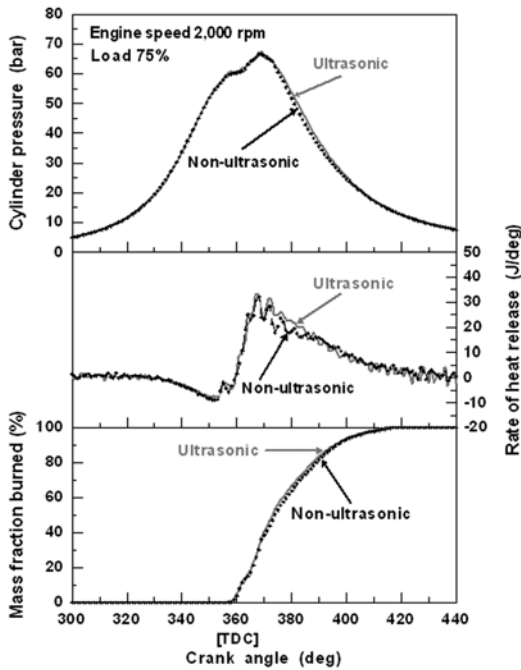


Fig. 3 Comparison of cylinder pressure, heat release rate and mass fraction burned under the engine speed 2,000rpm and load 75%

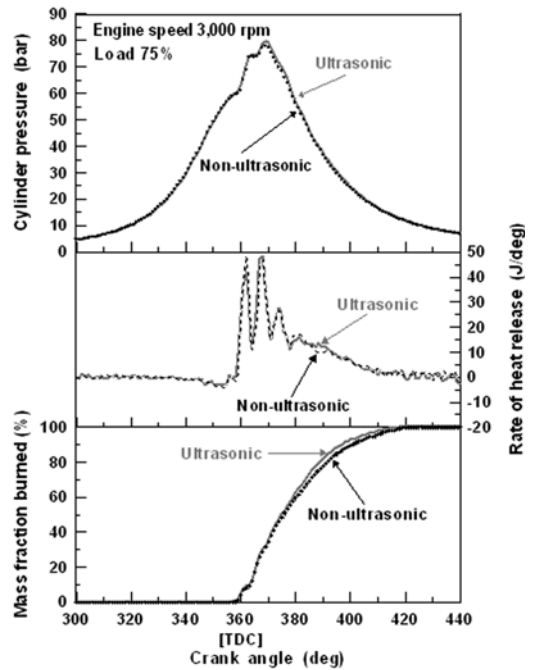


Fig. 5 Comparison of cylinder pressure, heat release rate and mass fraction burned under the engine speed 3,000rpm and load 75%

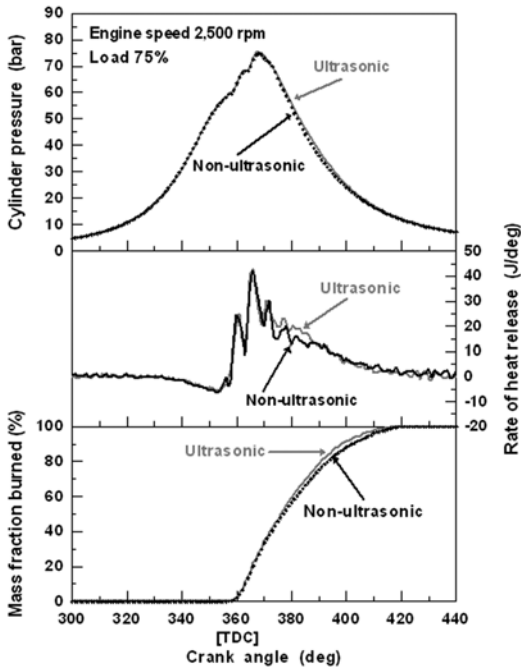


Fig. 4 Comparison of cylinder pressure, heat release rate and mass fraction burned under the engine speed 2,500rpm and load 75%

생성되는 0 ~ 10% 구간에서 연소가 미약하게나마 일찍 일어나고 주연소기간인 10 ~ 90% 사이에서는 연소속도가 빨라지면서 연소가 일찍 종료되는 등 연소기간 단축과 같은 연소개선이 일어난 것을 볼 수 있다.

이러한 원인은 연료에 초음파에너지 조사시 공동 현상, 방사압, 지향성 및 직진류 등과 같은 초음파 주요 지배인자들의 영향으로 인해, 연료의 분자구조 변화로 인해 세탄가가 증가⁵⁾하고, 연료의 점도 및 표면장력이 저감되고 분사된 연료의 평균분무입경 크기가 감소⁶⁾하는 등 여러 가지 개질효과로 인해 착화성이 향상되어 연소가 빨리 시작되고 보다 활발한 이루어져 연소실 최고압력이 상승하였고 연소가 일찍 종료된 것으로 판단할 수 있다.

3.2 연소기간에 대한 초음파 영향

본 논문에서 연소기간은 연소실 압력 및 크랭크 각도를 토대로 계산된 열발생율 곡선을 적분하여 구한 질량연소율에서 연소 시작점과 연소 종료점사이의 기간으로 설정하였다.

연소 시작점은 상사점을 기준으로 압축과정 방향으로 열발생율이 양에서 음으로 바뀌는 지점으로, 연소 종료점은 상사점을 기준으로 팽창과정 방향으로 열발생율이 양에서 음으로 바뀌는 지점으로 정의하였다.

Fig. 6 ~ 8은 기관회전속도 2,000rpm, 2,500rpm 및 3,000rpm에서 부하변화에 대한 연소기간을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이, 초음파 개질 연료 및 상용 연료 모두 고부하 영역으로 갈수록 연소기간이 증가하였는데, 이는 저부하 영역에 비해 고부하 영역으로 갈수록 연소실내로 분사되는 연료량이 많아졌기 때문이다.

또한 본 실험의 운전범위 내에서 상용 연료에 비해 초음파 개질 연료의 연소기간이 2.2% ~ 6.8%로

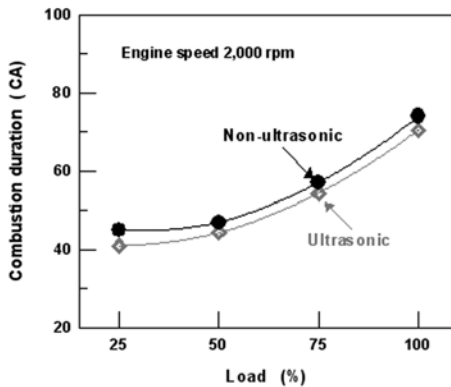


Fig. 6 Comparison of combustion duration under varying load at engine speed 2,000rpm

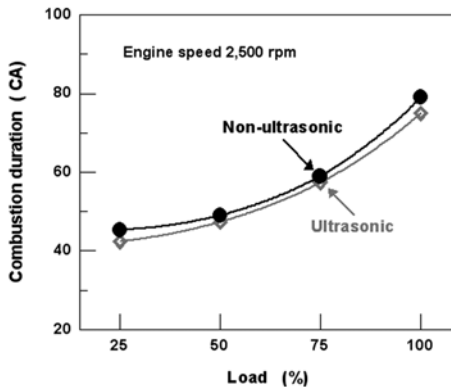


Fig. 7 Comparison of combustion duration under varying load at engine speed 2,500rpm

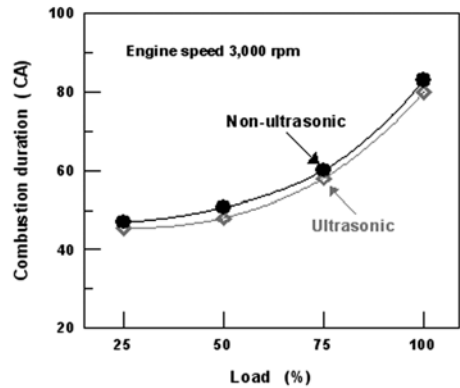


Fig. 8 Comparison of combustion duration under varying load at engine speed 3,000rpm

단축되었다.

이것 역시 전술한 바와 같이 초음파의 공동현상, 지향성 등과 같은 주요인자들의 영향으로 연료의 점도 및 표면장력이 저감되고 분무입경 크기가 감소되는 물리적 특성변화와 방향족 성분이 지방족 성분으로의 전환과 이소파라핀이 노멀 파라핀으로의 변환되고 세탄가가 증가하는 화학적 특성변화와 같은 연료개질로 착화성이 향상되고 연소속도가 증가하는 등 연소개선이 이루어졌기 때문으로 판단할 수 있다.⁵⁻⁷⁾

3.3 매연저감에 대한 초음파 영향

일반적으로 압축착화 디젤기관에서 배출되는 매연은 연소가 시작되는 즉시 발생하는 것이 아니고 화염 중 생성되는 핵이 응고 및 응집하는 과정에서, 탈수소 및 산화경로와 직접 생성하는 경로와의 밸런스 과정 중에 생성되기 시작한다.

매연의 생성속도는 운전조건 및 피크농도보다 연소후반부의 공기이용률의 영향을 크게 받기 때문에 연소특성 중에서 연소기간과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다.^{8,9)}

Fig. 9 ~ 11은 기관회전속도 2,000rpm, 2,500rpm 및 3,000rpm에서 부하변화에 대한 매연의 배출량을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 상용 연료 및 초음파 개질 연료 모두 고부하 영역으로 갈수록 매연 배출량이 급격히 증가한 것을 볼 수 있는데, 이는 디젤기관의 연소특성상 저부하 영역에 비해 고부하 영역에

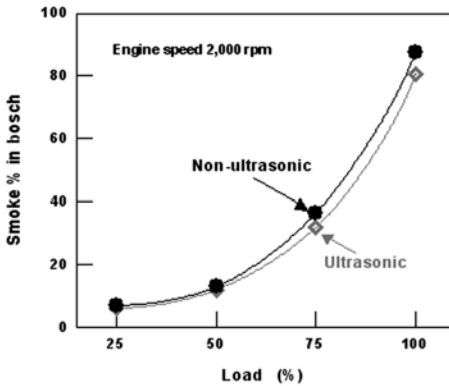


Fig. 9 Comparison of Smoke under varying load at engine speed 2,000rpm

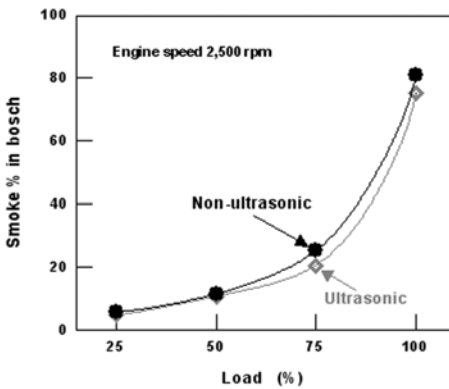


Fig. 10 Comparison of Smoke under varying load at engine speed 2,500rpm

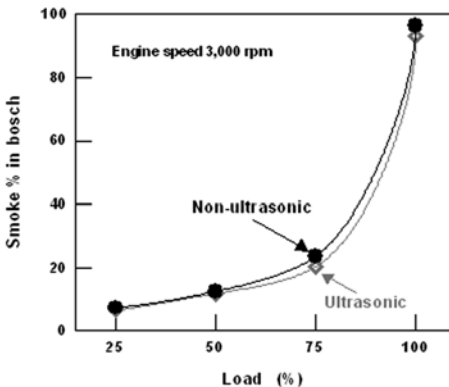


Fig. 11 Comparison of Smoke under varying load at engine speed 3,000rpm

서 공기이용률이 상대적으로 불충분하고 연료공급량이 많아졌기 때문으로 판단된다.

또한 상용 연료에 비해 초음파 개질 연료가 모든 부하 영역에서 매연 배출량이 최소 3.6%, 최대 19.0% 감소하였다.

이것 역시 초음파에너지 조사에 의해 연료의 점도와 표면장력 저감되고 분무입경 크기가 작아져서⁶⁾ 증발이 쉽게 이루어졌기 때문으로 사료된다.

또한 연료의 화학적 특성인 분자구조 변화에 따른 세탄가 증가^{5,7)}로 인한 착화성 향상으로 공기와 혼합이 충분히 이루어져 연료가 분해온도에 도달할 때 산소와의 충분한 결합으로 매연농도가 저감된 것으로 판단된다.

3.4 연소기간과 매연농도와의 상관성

Fig. 12는 본 실험의 운전조건인 기관회전속도 (2,000rpm ~ 3,000rpm) 및 부하율(25%, 50%, 75%, 100%) 변화 시 연소기간에 대한 상용 연료 및 초음파 개질 연료의 매연농도를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 상용 연료 및 초음파 개질 연료 모두 연소기간이 증가함에 따라 매연농도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 연소기간 60°CA 정도를 기준으로, 매연농도가 60CA 이전에서는 상용 연료는 40% 이하, 초음파 개질 연료는 35% 이하이지만, 60CA 이상이 되면 양쪽 모두 매연농도가 급격히 증가하였다.

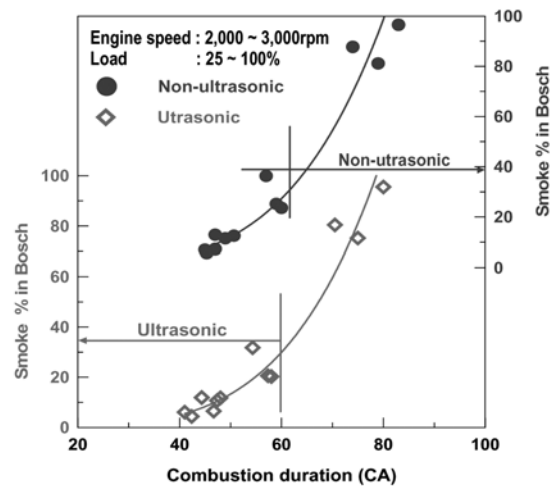


Fig. 12 Correlation between combustion duration and smoke concentration for conventional diesel fuel and ultrasonically reformed diesel fuel

이것으로 볼 때, 상용 연료 및 초음파 개질 연료 모두 매연농도는 연소시간과 밀접한 관련성이 있다고 볼 수 있으며¹⁰⁾ 매연농도를 감소시키기 위해서는 상용 연료 및 초음파 개질 연료 모두 연소시간을 60°C 이하로 단축시키는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

4. 결론

초음파에너지 조사에 의해 개질된 연료를 디젤기관에 적용하였을 시 초음파에너지가 디젤기관의 매연저감에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초음파 개질 연료가 연소실내 최고압력, 열발생율 및 질량 연소율 등을 포함하여 상용 연료에 비해 연소성능이 향상되었다.
- 2) 본 실험의 모든 운전범위 내에서 초음파 개질 연료가 상용 연료에 비해 연소시간이 최대 7% 단축되었다.
- 3) 초음파 개질 연료가 상용 연료에 비해 매연농도가 최대 19% 감소하였다.
- 4) 본 실험의 운전범위 내에서 상용 연료와 초음파 개질 연료 모두 연소시간이 60°C 이내일 때 매연 배출량이 최대 40% 이내이나, 그 이상이 되면 매연 배출량이 모두 급격히 증가하였다.

References

- 1) S. Shundo, T. Kakegawa, M. Shibuya and T. Yamashita, "Effects of Fuel Properties on Diesel Engine Emissions," JSAE, Vol.51, No.5, pp.71-75, 1997.
- 2) Y. Akasaka and Y. Sakurai, "Effects of Fuel Properties on Exhaust Emission from DI Diesel Engine," Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, Vol.63, No.607, pp.1091-1097, 1997.
- 3) H. Hoshi, "Possibility of Emission Reduction by Fuel Quality Improvements," JSAE, Vol.51, No.5, pp.65-70, 1997.
- 4) S. Kobayashi, T. Nakajima and M. Hori, "Effect of Fuel Properties on Diesel Exhaust Emissions," SAE 945121, 1994.
- 5) B. O. Lee and J. I. Ryu, "A Study on Relationship between Fuel Characteristics and Combustion Characteristics of Reformed Diesel Fuels by Ultrasonic Energy Irradiation (II)-Relationship between Chemical Structure and Cetane Number-," Transactions of KSAE, Vol.11, No.1, pp.64-71, 2003.
- 6) D. S. Choi, A Study on the Atomization Characteristics and the Engine Performance Characteristics of the Ultrasonic-Energy-Added Diesel Fuel, Ph. D. Dissertation, Chungnam National University, 1996.
- 7) B. O. Lee, "A Study on the Performance of the Diesel Engine with Ultrasonically Reformed Fuel," Ph. D. Dissertation, Chungnam National University, 2004.
- 8) Y. T. Oh, "Vegetable Oils for Diesel Fuel Substitutes," Journal of KSAE, Vol.18, No.2, pp.72-92, 1989.
- 9) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, pp.635-642, 1988.
- 10) Y. T. Oh, K. J. Cheong and T. Murayama, "A Study on Alternative Fuel as Fuel Substitutes in DI Diesel Engine III (Esterified Fuel, Analysis of Rate of Combustion Using by Wiebe's function)," Journal of KSAE, Vol.11, No.1, pp.31-39, 1989.