

디젤기관의 연소와 배출물에 관한 연구

- 경유-물-메탄올의 유화연료 사용시 -

A Study on Combustion and Exhaust Emission of Diesel Engine

- For Gas Oil-Water-Methanol Emulsified Fuel -

조진호* 김형섭** 박정률***
J. H. Cho, H. S. Kim, J. Y. Park

ABSTRACT

Combustion characteristic, concentration of NOx and exhaust smoke opacity was experimentally tested, according to fuel injection timing, mixing ratio of water and methanol for the driving condition of 2000 rpm of engine revolution and constant load (7.5 kg/cm²) using emulsified fuel of gas oil-water methanol. The result obtained was as following.

Thermal efficiency indicated highly 0.4-2.7% for emulsified fuel then gas oil, and injection timing when maximum thermal efficiency, slicily risen then gas oil.

For constant fuel injection timing ignition lag was increased, combustion duration decreased, maximum heat release rate indicated high, and concentration of NOx and exhaust smoke opacity is decreased, as function of water and methanol content y was higher.

1. 서 론

내연기관에 대한 연구는 기관의 경량화, 고효율화, 저연비 및 저공해 등 시대적인 요구에 부응하여 지속적으로 이루어져 왔다. 최근에는 특히 석유계 연료의 유한성에 따른 대체 에너지의 개발, 그리고 기관으로부터의 유해 배출물로 인한 환경오염이 사회적 문제점으로 대두되고 있어 저공해 연료의 개발에 많은 연구가 진행되고 있다. 이 가운데 대체 에너지 및 저공해 연료로 알콜을 연료로 사용하는 방법이 주목을 받고 있다. 그러나 알콜은 기화 잠열이 크고 또한 극단적으로 낮은 세탄가도 인하여 정상적인 운전이 곤란하다.

따라서 이를 보완하기 위하여 연료의 특성을 개선하는 방법으로는 경유와의 혼합방식¹⁾, 경유-물-알콜의 유화방식²⁾, 착화촉진제의 첨가방식³⁾ 등이 있으며, 그리고 착화특성의 개선방법으로는 경유를 보조로 분사하는 방식⁴⁾, 불꽃점화⁵⁾ 또는 열면점화 방식⁶⁾, 잔류가스 점화방식⁷⁾ 등이 그동안 연구되었다. 연료특성을 개선하는 방식은 기관의 대폭적인 개조를 하지 않고서도 안정된 연소를 확보할 수 있으나 대체비율(20~30%)이 낮은 단점이 있으며, 그리고 착화특성을 개선하는 방법은 대체비율(80~90%)은 높으나 기관의 대폭적인 개조가 요구되는 단점이 있다.

연료의 특성을 개선하는 방법 중에서 액체

* 정회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과

** 정회원, 아주대학교 공과대학 기계공학과

*** 정회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과

연료에 소량의 물을 첨가시킨 유화연료(emulsified fuel)는 물이 액체연료의 기화를 촉진시켜 효율적인 연소진행을 도와주므로 기관의 성능이 향상되며, 그리고 유해 배출물의 농도는 저감되므로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{2,8~10)}

그러나 이들 연구의 대부분은 경유에 메탄올을 첨가한 혼합연료, 경유-물의 유화연료를 사용하는 경우에 연소특성 및 배출물에 관한 고찰들이며, 경유-물-메탄올을 사용하는 경우 물 및 메탄올의 첨가비율에 따른 연소특성 및 배출물에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 디젤 기관에 경유-물-메탄올의 유화연료를 사용하여 운전하는 경우 물 및 메탄올의 첨가비율과 연료의 분사시기가 연소특성 및 배출물의 농도에 미치는 영향에 대해 실험적으로 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법과 시험연료

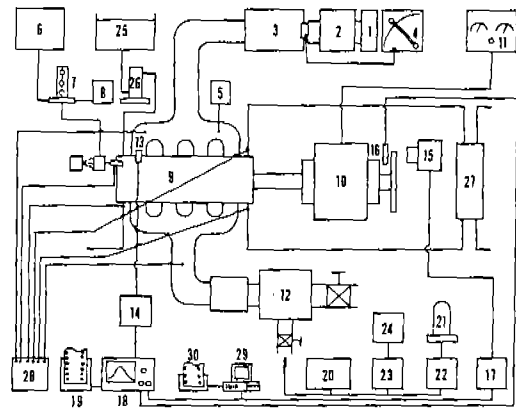
2.1 실험장치

본 연구에 사용된 기관은 4행정 4실린더 와류식식 디젤기관이며, 주요제원은 Table 1과 같다.

실험장치는 디젤기관을 비롯하여 흡·배기계, 연료공급계, 냉각계, 측정 및 분석계 등으로 구성되어 있으며 그 개략도는 Fig.1과 같다.

Table 1 Specification of Engine

Engine type		Water cooled 4 Cycle 4 Cylinder Diesel Engine	
Piston displacement	cc	2184	
Bore × Stroke	mm	86.0 × 94.0	
Connecting rod length	mm	157.0	
Max. output	ps/rpm	72/4250	
Max. torque	kg-m/rpm	14.7/2500	
Valve timing	Intake	I. V. O.	13° BTDC
		I. V. C.	39° ABDC
	Exhaust	E. V. O.	60° BBDC
		E. V. C.	8° ATDC



- 1. Heater
- 2. Humidifier
- 3. Inlet air surge tank
- 4. Inclined manometer
- 5. Hydrometer
- 6. Fuel tank
- 7. Burette
- 8. Fuel tank
- 9. Diesel engine
- 10. Eddy current dynamometer
- 11. Current controller
- 12. Exhaust gas surge tank
- 13. Pressure transducer
- 14. Charge amplifier
- 15. Projector
- 16. Receiver
- 17. Source of electricity focus
- 18. Combustion analyzer
- 19. Graphic print
- 20. CO-HC analyzer
- 21. Standard gas
- 22. NOx analyzer
- 23. Smoke meter
- 24. Air compressor
- 25. Cooling water tower
- 26. Rotary flowmeter
- 27. Engine oil cooling system
- 28. Digital thermometer
- 29. IBM-PC/386
- 30. Line printer

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 실험방법

기관의 회전속도 및 부하는 전기동력계의 전류를 조절하여 각각 2000 rpm, 7.5 kg/cm²으로 일정하게 유지하였으며, 본 연구에서 선정한 시험연료, 즉 경유-물-메탄올의 유화연료 사용시 물 및 메탄올의 첨가비율과 연료분사시기 변화에 따른 열발생율, 연소최고압력, 연소기간 및 착화지연 등의 연소특성과 NOx 및 배기 매연의 농도를 측정하였다.

냉각수 온도는 로타리 유량계의 유량 조절 밸브로 85 ± 2 °C, 그리고 기관의 윤활유 온도는 윤활유 냉각기의 냉각수량을 조절하여 90 ± 2 °C로 일정하게 유지시켜가며 실험을 하였다.

또 대기조건(대기압력, 흡기의 온도 및 습도)은 가열기와 가습기를 이용하여 설정조건인 23 ± 1 °C, 36 ± 1 %, 그리고 연료 온도는 분사펌프에 분무기로 물을 분사시켜 35 ± 1 °C로 일정하게 유지시켰다.

연료 온도는 분사펌프에서 연료소비계로 리

턴되는 관에 열전대를 삽입하여 측정하였으며, 흡입공기량은 흡기 서지 탱크에 맥동 흡수막과 계측용 노즐을 부착하여 노즐 전후의 압력차를 경사 마노메타를 이용하여 측정하였다.

실린더내 연소상태를 측정하기 위하여 압력변환기(Type 601 A, KISTLER)를 예열 플러그 구멍에 설치하였으며, 연소실내의 고온, 고압가스로 인한 압력변환기의 과열은 냉각 어댑터와 송풍기를 이용하여 방지하였다.

연소특성 해석은 연소해석장치(CB-386, ONO-SOKKI), 차지 앰프(Type 5000, KISTLER), 압력변환기, 크랭크 각도 검출기(Type pp-935, ONO-SOKKI) 등을 이용하였으며, 그 기록은 디지털 프린트와 IBM-PC/386을 사용하였다.

또 축 토크와 축출력은 와전류식 전기동력계(1014 D.G., TOLEDO), 배출 가스 중 NOx의 농도는 NOx 분석기(HORIBA), 그리고 매연의 농도는 스모크미터(DSM-10, BANZAI)로 측정하였다.

2.3 시험연료

2.3.1 유화제(surfactant)

유화제는 분자구조상 기름에 용해되기 쉬운 친유기와 물에 용해되기 쉬운 친수기를 가지고 있으며, 이는 분산상 입자의 계면에 응집하여 분산상 입자와 연속상 입자 사이의 계면장력을 작게 한다. 이로써 분산상의 기계적 미립자화를 쉽게 하는 동시에 생성된 유화유의 계면 자유 에너지를 작게 하여 열역학적 불안정도를 감소시켜 주는 역할을 하게 된다.

유화제는 HLB (Hydrophile Lipophile Balance)가 방법으로 선정하게 되며, 분자구조에 따라 W/O형(Water in Oil)과 O/W형(Oil in Water)으로 구분된다. W/O형을 형성시키는 유화제는 분자내의 친유기가 친수기보다 큰 경우(HLB<7)이고, O/W형은 그 반대의 경우(HLB>7)이다.⁸⁾

따라서 유화연료 제조시 유화제의 선정 및 첨가량은 연료의 물리적 화학적 특성에 따라 결정해야 한다. 일반적으로 경유에다 물을 첨가한 유화연료의 제조시에는 유화제로 Span

80(Sorbitan Monooleate, HLB가=4.3, Sigma Chemical Co.)을 사용하였고, 경유-메탄올의 경우에는 Span 85(HLB가=1.8, Sigma Chemical Co.), 그리고 경유-물-메탄올은 Span 80과 Span 85를 적절하게 혼합한 HLB가 1.8~4.3의 유화제를 사용하였으며 그 첨가량은 물 및 메탄올의 혼합비율에 관계없이 경유의 2%(중량비)를 첨가하였다.

2.3.2 유화연료의 제조

시험연료인 유화연료는 경유-메탄올에 물을 혼합한 것으로 함수율($y = G_w / (G_w + G_m)$)이 0.5, 함수 메탄올율($R_m = (G_w + G_m) / (G_w + G_m + G_o)$)이 각각 0.2, 0.4이며, 유화제는 Span 80과 Span 85를 적절하게 혼합한 HLB가 1.8~4.3를 경유의 2%(중량비) 첨가하여 교반시킨 것이다.

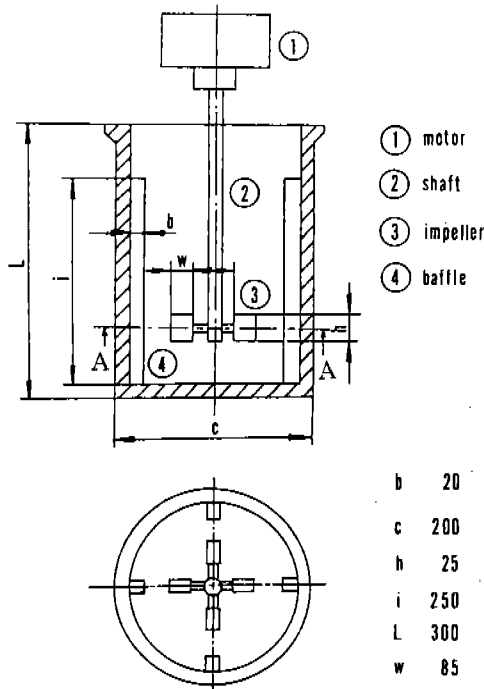
일반적으로 유화연료의 제성상은 제조시의 혼합온도 및 교반방법 등에 따라 영향을 받는다. 특히 교반방법이 터빈 블레이드식 교반기와 같이 기계적 교반방법에 의한 혼합방식은 교반량 및 시간, 터빈 블레이드의 회전속도, 그리고 잠김 깊이 등이 대단히 중요하다.

따라서 본 연구에서는 Fig.2에 나타낸 것과 같은 원통형의 교반조를 제작하여 사용하였으며, 교반방법은 경유에 유화제를 첨가한 후 정해진 물 및 메탄올을 첨가시켜 20분간 교반하였다.

2.3.3 유화연료의 성상

유화연료는 교반직후 수초내에 우유빛의 백색 에멀전 상태로 되었다. Fig.3은 함수 메탄올율 R_m 의 변화에 따른 상온(20℃)에서 유화연료의 점도를 측정된 것을 나타낸 것으로 점도는 함수 메탄올율이 높아짐에 따라 점도가 증가함을 알 수 있다.

Fig.4,5는 유화연료 제조시 첨가하는 유화제의 HLB가 유화연료($y=0.5, R_m=0.2$)의 안정성과 상분리 현상에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 선도에서 보는 바와 같이 HLB가 3.3~3.5의 유화제를 사용하는 경우에 2시간 이내에는 상분리가 일어나지 않고 안정성이 있는 반면에 HLB가가 이보다 클 경우에는 에멀전의 상층 및 하층에서 상분리가 발생하고,



Section AA
Fig. 2 Apparatus of agitator

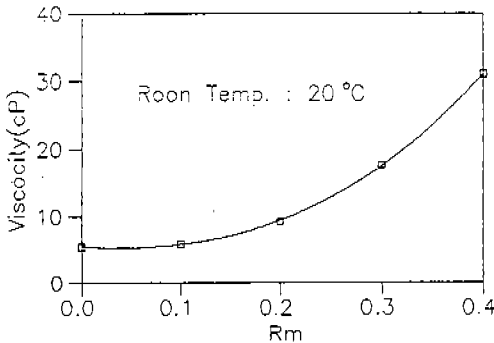


Fig. 3 Viscosity variation according to R_m ratio of emulsion

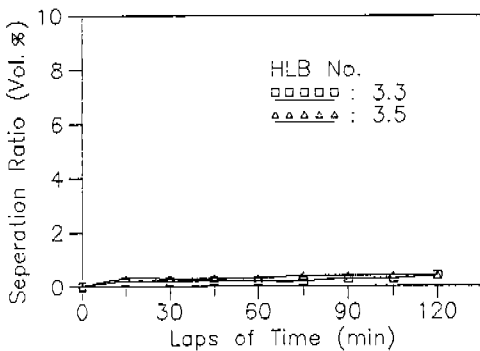


Fig. 4 The stability of emulsified fuel

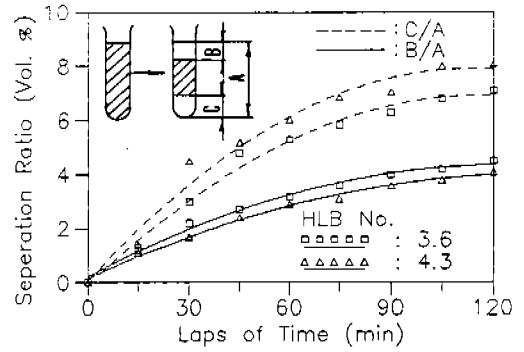


Fig. 5 The stability of emulsified fuel

또 이보다 작은 경우에는 하층에서 상분리가 일어남을 알 수 있다.

또 유화연료 제조시 사용한 유화제는 소르 바이탄과 각종 지방족의 에스테르 화합물로 이루어져 있고, 구조적으로는 C. H. O. 의 원소로 구성되어 있는 이성체의 화합물이다. 이러한 유화제는 220~350 °C에서 대부분 CO₂ 와 H₂O로 분해되지만 탄분이 0.2~0.3% 정도 배출된다.

그러나 본 연구에서 유화제 첨가량은 중량 비로 경유의 2%정도로 미량이므로 유화제의 첨가로 인한 연료소비율, 출력, NO_x 및 매연의 생성농도 등에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 가정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

유화연료를 사용하여 기관의 회전속도를 2000 rpm, 그리고 일정 부하(BMEP=7.5 kg/cm²)로 기관을 운전하는 경우 유화연료의 불 및 매탄을 첨가비율과 연료의 분사시기 변화에 따른 연소특성과 유해 배출가스의 농도에 미치는 영향을 실험적으로 구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

3.1 연소특성

Fig.6 과 Fig.7은 연료의 분사시기 변화(BTDC 22~6°)에 따른 공기과잉율과 열효율을 각각 나타낸 것이다. 선도에서 보는 바와 같이 공기과잉율이 최대가 되는 분사시기는 열효율이 최대치로 나타나는 분사시기인

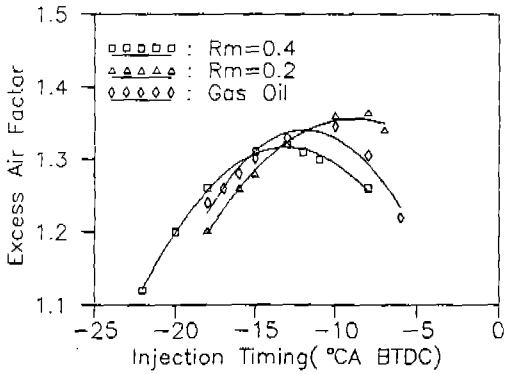


Fig. 6 Effect of fuel injection timing and R_m ratio on excess air ratio

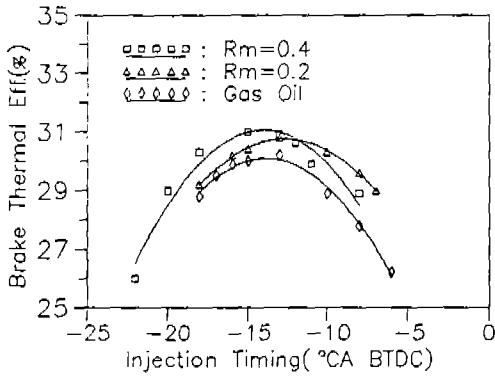


Fig. 7 Effect of fuel injection timing and R_m ratio on thermal efficiency

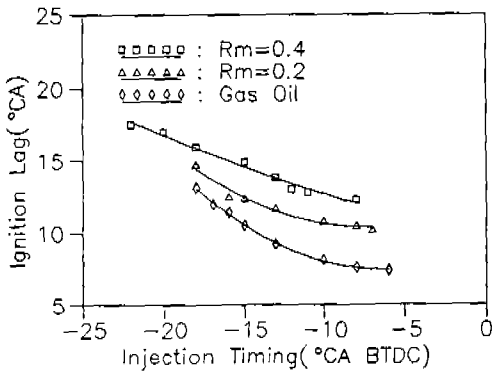


Fig. 8 Effect of fuel injection timing and R_m ratio on ignition lag

BTDC 9~14° CA사이이며, 그리고 유화연료가 순수한 경유로 운전하는 경우에 비하여 열효율이 0.4~2.7% 정도 높게 나타남을 알 수 있다.

Fig.8은 분사시기 변화에 따른 각 연료의 착화지연기간을 나타낸 것이다. 선도에서 보는 바와 같이 분사시기가 늦어지게 되면 압축에 의한 연소실내 가스의 온도가 상승되어 착화지연기간이 단축되며, 그리고 함수 메탄올을 R_m 이 높을수록 착화지연기간이 길어짐을 알 수 있다. 유화연료의 함수 메탄올을 R_m 이 높아지면 동점도가 증가⁹⁾되어 사우터의 평균 입경이 커지게 되며¹⁰⁾, 또한 물리적 측면의 착화지연기간 중에서 유림의 증발시간 증가와 유화연료 증 수분의 증발 및 메탄올의 기화잠열 증대에 따른 온도강하로 인하여 착화지연기간이 길어지는 것으로 판단된다.

Fig. 9~11은 분사시기 변화에 따른 최대열발생율, 최대열발생율이 일어나는 크랭크 각 및 연소기간을 각각 나타낸 것이다. 선도에서

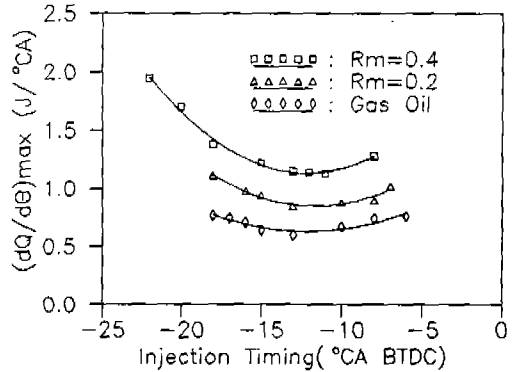


Fig. 9 Effect of fuel injection timing and R_m ratio on maximum of heat release

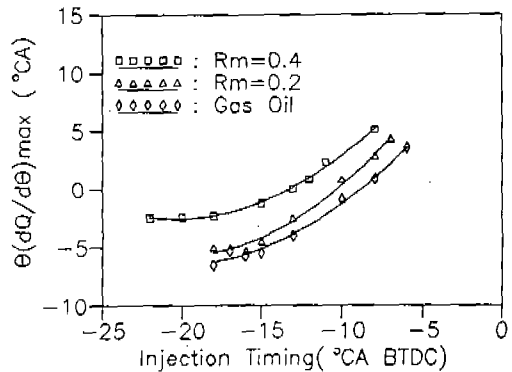


Fig. 10 Effect of fuel injection timing and R_m ratio on maximum of heat release at crank angle

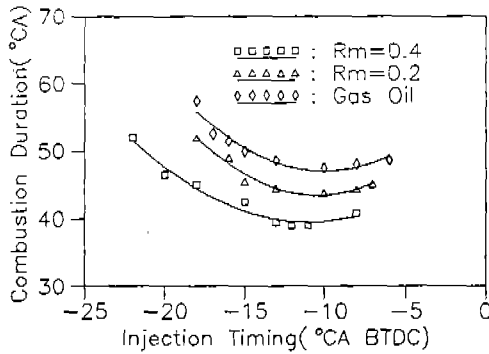


Fig. 11 Effect of fuel injection timing and R_m ratio on combustion period

보는 바와 같이 함수 메탄올을 R_m 이 높아지면 최대열발생율은 높게 나타나게 되며, 그리고 최대열발생율이 나타나는 크랭크 각은 기화잠열의 상승에 기인하는 착화지연기간의 증가로 인하여 상사점에서 멀어지게 되고, 또 연소기간은 단축됨을 알 수 있다. 본 실험에 사용된 경유-물-메탄올의 유화연료는 HLB가 7 이하이므로 W/O형이다. 따라서 최대열발생율이 함수 메탄올을 R_m 의 증가와 함께 다소 높게 나타나는 것은 ①유화연료 중 미세한 물 입자의 급속한 기화로 인한 체적팽창, 즉 미세폭발에 의한 연료유적의 재미립화와분무의 운동량 증가로 인한 공기와 연료의 혼합이 촉진되므로 연소가 급속하게 일어나게 되고, ②기화잠열의 증대로 인하여 착화지연기간이 보다 길어지게 되므로 이 기간중에 증발된 연료증기의 축적량이 많아져서 급격한 연소가 일어나기 때문이라고 판단된다.

3. 2 배출물의 농도

3.2.1 NOx의 배출농도에 미치는 영향

Fig. 12는 연료의 분사시기 변화에 따른 NOx의 배출농도를 나타낸 것이다. 선도에서 보는 바와 같이 분사시기가 빨라지면 NOx의 배출농도가 높아지고, 동일 분사시기의 경우 유화연료가 순수한 경유에 비하여 NOx 배출농도가 낮아지며, 그리고 함수 메탄올을 R_m 이 높을수록 NOx의 배출농도가 낮아짐을 알 수 있다. 연소에 의해 생성되는 NOx의 생성농도를 지배하는 주요인자는 이미 잘 알려져 있는 바

와 같이 연소역에 있어 산소의 농도, 연소온도, 그리고 고온가스의 체류시간이다. 따라서 유화연료 사용시 함수 메탄올율이 높을 수록 NOx의 배출농도가 낮아지는 것은 ①에멀전 중 수분의 증발에 의한 연소온도의 강하, ②유화연료의 연소시 미세폭발 효과로 인한 연소 촉진 작용으로 온도강하가 빨라지므로 고온가스의 체류시간 단축, ③유화연료 중 수분의 증발로 인하여 발생하는 수증기에 의해 연소실내의 가스가 희석되어 산소농도가 낮아지기 때문인 것으로 판단된다.

3.2.2 배기매연의 농도에 미치는 영향

Fig. 13은 연료의 분사시기 변화에 따른 배기 매연의 농도를 나타낸 것이다. 선도에서 보는 바와 같이 연료의 분사시기가 늦어짐에 따라, 그리고 동일 분사시기의 경우 함수 메탄올율이 높을수록 배기 매연이 저감됨을 알 수

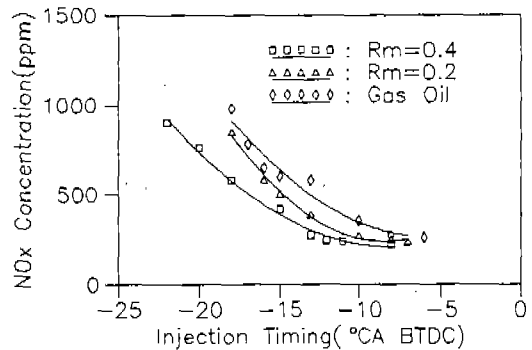


Fig. 12 Effect of fuel injection timing and R_m ratio on NOx concentration

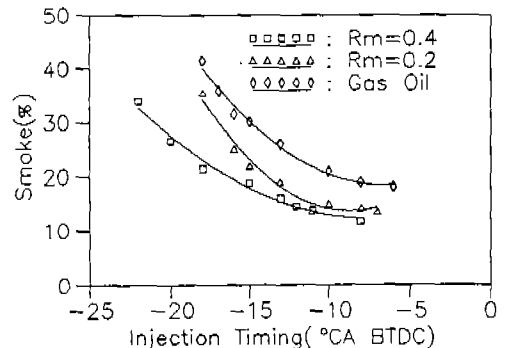


Fig. 13 Effect of fuel injection timing and R_m ratio on smoke opacity

있다. 일반적으로 압축착화기관으로부터 배출되는 배기 매연의 농도는 화염중에 생성되는 nuclei가 응고, 응집하는 과정의 탈수소과정, 그리고 산화과정으로 되는 경로와 직접 생성되는 경로의 발란스로 결정된다. 이때 유리탄소(매연)는 예혼합연소기간 보다 확산연소기간에서 생성되는 비율이 높으므로 확산연소기간의 장단과, 확산연소기간에서 탄소 입자의 양 및 산화정도가 배기매연의 농도에 영향을 미치며, 그리고 탄소 입자의 연소는 저온도 분위기에 장시간 존재하는 것 보다 고온도분위기에서 단시간 존재하는 것이 빠르게 진행된다. Fig.9에서 보는 바와 같이 분사시기가 늦어질수록 착화지연기간이 짧아지며, 그리고 동일 분사시기의 경우에는 함수 메탄올을 R_m 이 높을수록 착화지연기간은 길어진다. 착화지연기간이 길어지면 예혼합연소비율이 낮아지고 확산연소비율은 높아지게 된다. 따라서 배기매연의 저감은 착화지연기간이 길어지는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

수냉식 4행정 4실린더 디젤 기관의 연료로 경유-물-메탄올의 유화연료를 사용하여 기관의 회전속도 2000 rpm, 일정부하(bmep = 7.5 kg/cm²)로 운전하는 경우 함수 메탄올을 R_m 및 연료의 분사시기의 변화에 따른 열효율, 착화지연기간, 최대열발생을 및 연소기간 등의 연소특성과 NO_x의 배출농도 및 배기매연에 미치는 영향을 실험적으로 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유화연료를 사용하여 기관을 운전하는 경우가 순수한 경유에 비하여 열효율이 0.4~2.7% 정도 높게 나타나며, 이때 열효율이 최대로 되는 분사시기는 경유에 비하여 약간 빠르다.
2. 착화지연기간은 동일 분사시기의 경우 함수 메탄올을 R_m 이 높을수록 기화잠열에 의한 연소실내 가스의 온도강하로 인하여 길어진다.
3. 최대열발생율은 분사시기를 앞 당기거나

늦추면 높아지며, 그리고 동일 분사시기의 경우 함수 메탄올을 R_m 이 높을 수록 증가된다.

4. 연소기간은 연료의 분사시기를 앞 당기거나 늦추게 되면 길어지며, 그리고 동일 분사시기의 경우 함수 메탄올을 R_m 이 높을 수록 단축된다.
5. NO_x의 배출농도는 연료의 분사시기가 빠를수록 높아지며, 그리고 동일 분사시기의 경우 함수 메탄올을 R_m 이 높을 수록 감소된다.
6. 배기매연의 농도는 연료의 분사시기가 빠를수록 높아지며, 그리고 동일 분사시기의 경우에는 함수 메탄올을 R_m 이 높을수록 경유로 운전하는 경우에 비하여 대폭 감소된다.

참 고 문 헌

1. 村山正, 宮本登, 山田遺延, 川島純一, "アルキュル駆動ディーゼル機関に関する研究", 日本機械學會論文集(B編), 48卷 434號, pp.2134~2142, 1982.
2. Angelo De Vita, "Multi-cylinder D.I. Diesel Engine Tests with Unstabilized Emulsion of Water and Ethanol in Diesel Fuel", SAE Paper 890450, 1989.
3. Hardenberg, H.O., "Comparative Study of Heavy-Duty Engine Operation with Diesel Fuel and Ignition-Improved Methanol", SAE Paper 872093, 1987.
4. 塚原實, 近久武美, 宮本登, 村山正, "補助噴射によるディーゼル機関のNO_x低減に関する研究", 日本機械學會論文集(B編), 46卷 407號, pp.1355~1361, 1980.
5. Terry L. Ullman and Charles T. Hare, Thomas M. Baines, "Emissions from Direct-Injected Heavy-Duty Methanol-Fueled Engines (One Dual-Injection and One Spark-Ignited) and a Comparable Diesel Engine", SAE Paper 820966, 1982.
6. 柄澤隆夫, 川口曉生, 志賀聖一, 倉林俊雄,

- “アルキュールディーゼルの熱面による着火補助効果とその機構”, 日本機械學會論文集(B編), 54巻503號., pp.1848~1855, 1988.
7. Michael D. Jacson and Stefan Unnasch, Cindy Sullivan, Roy A. Renner, “Transit Bus Operation with Methanol Fuel”, SAE Paper 850216, 1985.
 8. 塚原實, 村山正, 吉本康文, “ディーゼル機関に水・エマルジョン燃焼法を適用した場合の燃焼促進効果に及ぼす燃料性状の影響”, 日本機械學會論文集(B編), 48巻428號, p.801, 1982.
 9. 村山正, 塚原實, 宮本登, 森島泰, “ディーゼル機関におけるNO_x低減に関する研究”, 日本自動車技術會論文集, Vol. 16, pp. 30~37, 1978.
 10. 廣安博之, 新井雅隆, 西田恵哉, “乳化重質燃料の燃焼機構に関する研究(第1報, 燃焼特性の測定)”, 日本機械學會論文集(B編), 48巻430號, pp.1182~1189, 1982.
 11. 梶谷修一, 澤則弘, “軽油・水(W/O形)乳化燃料に関する研究(流動特性の時間的推移について)”, 日本機械學會論文集(B編), 56巻531號., pp.338~375, 1990.