

직접분사식 디젤기관에서 함산소제 첨가에 의한 배출가스 저감에 관한 실험적 연구

The Experimental Study on Emission Reduction by Oxygenate Additive in D.I. Diesel Engine

최 승 훈*, 오 영 택**
Senughun Choi, Youngtaig Oh

ABSTRACT

Recently, our world is faced with very serious and hard problems related to the air pollution due to the exhaust emissions of the diesel engine.

In this paper, the effect of oxygen component in fuel on the exhaust emissions has been investigated for direct injection diesel engine.

It was tested to estimate change of engine performance and exhaust emission characteristics for the commercial diesel fuel and oxygenate blended fuel which has three kinds of mixed ratio. And, it was tried to analyze not only total hydrocarbon but individual hydrocarbon components from C1 to C6 in exhaust gas using gas chromatography to seek the reason for remarkable reduction of smoke emission.

This study was carried out by comparing the chromatogram with diesel fuel and diesel fuel blended DGM(diethylene glycol dimethyl ether) 5%.

The results of this study show that individual hydrocarbon(C1~C6) as well as total hydrocarbon of oxygenated fuel is reduced remarkably than that of diesel fuel.

주요기술용어 : Gas chromatography(가스 크로마토그래피), Oxygenated fuel(함산소연료), Diesel engine(디젤 기관), Hydrocarbon(탄화수소)

1. 서 론

연소라는 화학적인 반응을 이용하여 열에너지
를 기계적 에너지로 변환하여 동력을 얻을 수
있는 대표적인 기구로서 각종 내연기관은 발전

을 거듭하여 왔으며, 이 중에서도 디젤기관은 높
은 열효율을 낼 수 있고, 저급연료까지도 사용할
수 있어 그 수요가 증가되는 추세에 있지만, 기관
특성상 연소 후 배출되는 매연으로 인하여 전 지
구촌적인 대기오염의 주범으로 주목받고 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위한 방안으로 고
압분사에 의한 연소개선과 배출물 저감,¹⁾ 분사시
기 및 연료공급량의 제어,²⁾ 촉매에 의한 NOx의

* 회원, 전북대학교 기계공학과 대학원

** 회원, 전북대학교 기계공학부
자동차신기술 연구소

저감,³⁾ 연소실 형상변화로 스웰과 텀블에 의한 NOx와 매연의 동시저감⁴⁾ 등이 시도되고 있다.

이러한 방법 이외에, 본 연구에서는 합산소연료를 사용하여 연료가 연소실내에서 연소하기 전에 연료성상을 변화시켜 배기가스 저감을 시도하고자 하였다. 즉, 기존의 화석연료는 연료자체속에 산소성분이 전혀 존재하지 않는 탄화수소 화합물이기 때문에 농후한 혼합기 영역 및 연소말기에 불완전 연소가 될 가능성이 농후하므로 연료자체에 산소를 다량 함유하고 있는 합산소연료를 기존의 경유와 혼합·사용하여 배출가스의 저감을 시도하고자 하는 것이다.

이러한 합산소연료를 이용한 실험들을 살펴보면, B.L. Edgar 등⁵⁾은 DME와 DMM을 이용하여 디젤기관에 적용한 경우의 자기착화 특성과 배기배출물 저감에 대한 연구를 수행하였고, 또한, Oh 등은 합산소연료와 EGR 방법을 병용하여 매연과 NOx를 동시에 저감시키는 연구⁶⁾에서 합산소연료가 매연과 NOx를 동시에 저감할 수 있는 가능성을 입증하였고, 또한 DMC(dimethyl carbonate)를 디젤기관에 적용한 연구⁷⁾에서 합산소연료가 고부하영역에서 디젤기관의 공기이용률을 높여준 결과 매연이 현저히 저감되었음을 보고하고 있다.

그러나, 본 연구에서 사용한 Diethylene glycol dimethyl ether(이하 DGM)를 적용한 이전의 연구⁸⁾는 DGM을 0.5~3%정도까지 혼합하여 약간의 PM저감과 NOx가 거의 변동이 없음을 확인하는데 만족하였다.

또한, 대부분의 배기가스 저감에 관한 연구는 통상적인 배기가스 분석기에 의한 THC(total hydrocarbon)나 PM(particulate matter)의 배출량 측정으로 각 구성성분에 대한 정확한 정량적인 정보를 주지 못하기 때문에 성분조성을 면밀하게 파악할 수가 없었다.

일반적으로 디젤기관에서 배출되는 미립자는 연료성상, 특히 방향족 탄화수소 함유율과 연료의 증류성의 영향을 받고 있다고 보고되고 있지만 그 생성원인은 명확하지는 않다. 현재의 소미

립자는 연료가 우선 저비등점 탄화수소로 분해되고 이중 축·중합, 탈수소반응에 따라 다환방향족 탄화수소를 지나서 미립자에 이르는 것이 주요 경로인 것으로 알려져 있다.¹⁰⁾ 즉, 연료성상이 미립자의 배출량에 영향을 미치는 것은 그의 분해, 축·중합과정에 차이가 발생하기 때문이라고 생각할 수 있다.

탄화수소는 저급 탄화수소로 열분해되어, CO 및 수소를 경유하여 탄산가스 및 수증기로 될 때까지 산화하며, 저급 탄화수소의 일부는 중합하여 원래 탄화수소보다 고급인 탄화수소도 생성된다고 알려져 있다.

본 연구에서는 합산소연료인 DGM을 경유에 혼합하여 사용할 경우 매연과 NOx의 배출특성은 물론 정량·정성 분석을 모두 이용가능한 가스 크로마토그래피(gas chromatography)를 이용하여 배기가스 성분 중에 함유되어 있는 C₁~C₆까지의 탄화수소의 정량적인 분석도 동시에 수행하여 저비등점 탄화수소와 고비등점 탄화수소가 매연생성에 미치는 영향을 조사하고자 하였으며, 알려진 바와 같이 탄소수가 4이하인 경우를 저비등점 탄화수소로, 5이상인 경우를 고비등점 탄화수소로 정의하였다.¹⁰⁾

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 단기통, 수냉식, 4행정, 직접분사식 디젤기관이며, 기관부하와 회전속도는 엔진 동력계에 의해 임의로 조절할 수 있도록 하였다.

실험에 사용된 기관의 사양은 Table 1에, 사용된 연료의 특성은 Table 2에 나타내었으며, 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

실험연료는 일반적인 상용 경유와 합산소연료인 DGM을 체적비율로 환산하여 각각 5%, 10%, 15% 혼합한 연료를 기관의 각 회전속도에서 제동평균유효압력(BMEP)의 변화에 따라 기관 성능과 각 배기가스의 농도를 측정하였다.

가스 크로마토그래피를 이용한 탄화수소류의

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine model	ND130DIE
Bore × Stroke	95 × 95 (mm)
Displacement	673 (cc)
Compression ratio	18
Combustion chamber type	Toroidal
Injection timing	BTDC 23 °CA
Coolant temp.	80 ± 2 °C

Table 2 Properties of test fuels

	Diesel fuel	Diethylene glycol dimethyl ether
Molecular formula	C ₁₂ H ₂₆	C ₆ H ₁₄ O ₃
Stoichiometric air fuel ratio	1 : 14.9	1 : 8.2
Molecular weight	226	134.2
Heating value [MJ/kg]	43.12	24.5
Oxygen content(%)	0	35.79

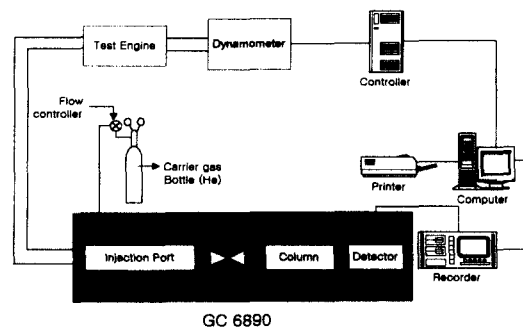


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

분석 실험은 매연저감 측면에서 상당한 효과를 보이면서, 질소산화물은 경유와 유사하게 배출한 DGM 5%를 경유에 혼합한 경우를 최적의 혼합율로 설정하여 분석·비교하였다.

배기가스 성분측정을 위한 가스 크로마토그래피의 사양은 Table 3에 표시하였으며, 실험조건은 기관의 각 회전속도에서 무부하, 25%, 50%, 75%, 90% 및 전부하의 경우 가스 크로마토그래

Table 3 Condition of GC for C1 ~ C6

GC	Hewlett Packard 6890GC
Column	HP-PLOT/Al ₂ O ₃ 30m × 0.53mm × 15.0µm film thickness
Carrier	He, 3ml/min constant flow
Oven	30 °C for 7.5min, Programmed at 20 °C/min to 180 °C
Injector	Split (15:1), Inlet 250 °C
Detector	FID, 250 °C

피를 통하여 나타난 크로마토그램의 피크 면적을 비교하여 각 탄화수소가 매연농도에 미치는 영향을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 각 연료의 혼합율에 의한 실험

Fig. 2는 기존 연료인 경유와 DGM을 5%, 10% 및 15% 혼합한 연료를 사용한 경우, 각 회전속도에서 제동평균유효압력 변화에 따른 매연 배출 특성을 나타낸 것이다.

디젤기관의 연소에서 공기이용율이 충분한 저회전·저부하에서는 합산소연료를 혼합한 경우에도 미량의 매연 배출량의 차이를 보이고 있지만, 기관의 회전수가 증가함에 따라 충전효율이 저감되는 고속영역에서는 매연 배출량에 현저한 차이를 보이고 있으며, DGM 5%를 혼합한 경우 최대 약 50%의 저감효과가 있어, 이와 같은 효과는 그림에서와 같이 고부하·고회전수로 진행할수록 매연 배출이 현격하게 차이가 남을 알 수 있다.

2500rpm에서 합산소연료를 혼합한 모든 경우에 있어서 전부하상태에서도 매연배출량이 40%를 넘지 않았지만, 경유를 연료로 사용한 경우에는 이미 1500rpm 전부하의 상태에서 매연배출량이 40%에 도달하는 것을 볼 수 있다.

이와 같은 매연은 연소실내에 공기가 부족한 분위기에서 연료가 열분해과정을 거친 후, 축·중합과정과 탈수소 반응을 거치면서 성장과정과 산화과정을 마친 후 산화되지 못한 성분이 배

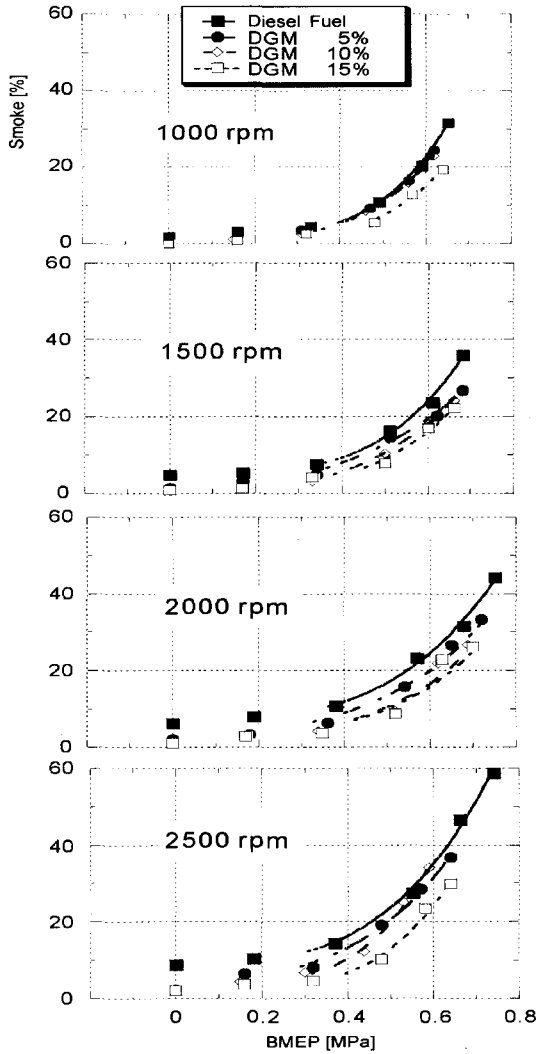


Fig. 2 Comparison of smoke density for difference of oxygenated fuel content under varying load and engine speed

기과정 중에 대기 중으로 배출되는 것이다.⁹⁾ 즉, 연소실내의 공기가 부족한 고부하·고회전 분위기의 경우 국부적으로 부족한 산소성분을 합산소연료가 충당하여 매연 배출이 저감된 것으로 생각된다.

Fig. 3은 Fig. 2와 같은 실험조건에서 기관의 부하변화에 따른 NOx의 배출특성을 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이, 경유의 경우보다 경유에

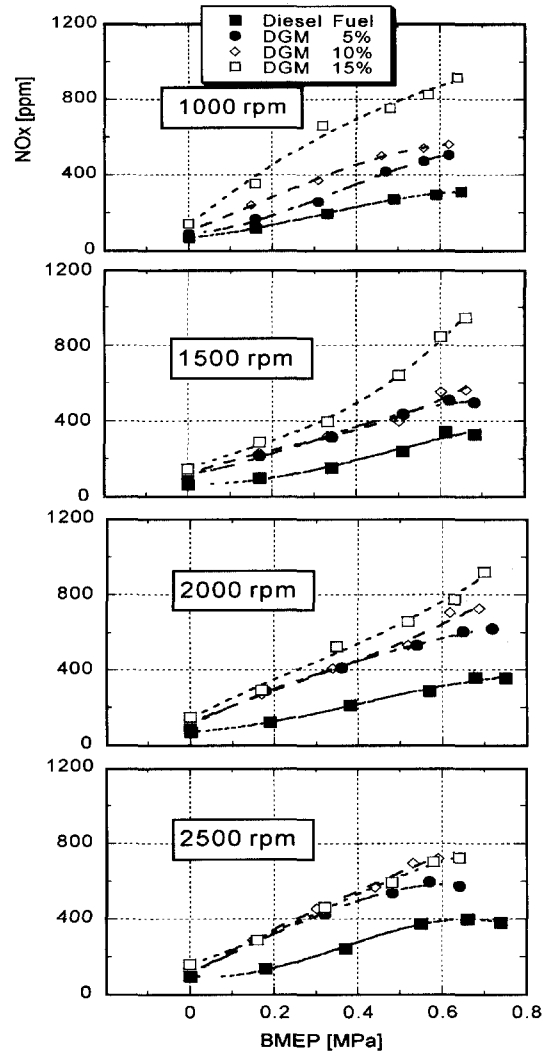


Fig. 3 Comparison of NOx emission for difference of oxygenated fuel content under varying load and engine speed

합산소연료인 DGM을 첨가한 경우가 전체적으로 NOx의 배출량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히, 각 회전속도 공히 저부하영역에서의 배출량 차이보다 고부하영역에서의 배출량 차이가 현저히 증가하였고, 합산소연료의 첨가량이 증가할수록 NOx배출량은 2000rpm까지는 급격하게 증가하나, 2500rpm의 경우는 그 증가폭이 둔화되는 것을 알 수 있다.

이는 합산소연료의 공급비율만큼 경유의 분사량이 줄어들기 때문에 발열량의 차이로 인하여 Prompt NOx의 생성이 줄어들고, 초기연소시 급격하게 연소가 일어남으로써 연소실의 압력 및 연소온도가 상승하게 되어 Thermal NOx가 지배적인 상태가 된 것으로 생각된다.

즉, 경유를 연료로 사용한 경우에는 합산소연료를 첨가한 경우보다 산소량이 상대적으로 감소하므로 초기의 급격한 연소의 감소로 Thermal NOx의 생성이 둔화되며, 합산소연료를 사용한 경우에는 연료 자체내에 포함된 산소성분에 의한 연소효율 개선으로 연소실 온도의 상승과 함께 전체적인 NOx의 증가가 발생하는 것으로 생각된다.

그러나, 2500rpm에서 합산소연료를 사용한 경우의 NOx의 증가폭이 저감되는 이유는 연소실 온도에 기여하는 합산소연료의 산소성분 영향보다는 연소시간 단축으로 인한 연소효율 저하 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 4는 1000rpm과 2000rpm에서 에너지소비를 비교한 것이다. 경유에 비하여 합산소연료인 DGM은 발열량이 약 57%에 불과하여 15%의 DGM을 혼합하여 사용한 경우에 경유의 발열량과의 차이는 약 6.5%정도가 되지만, 에너지소비율의 차이가 가장 크게 나타난 2000rpm 전부하의 경우에는 약 4.5%의 에너지소비율의 차이를 보이고 있다. 이는 연료내 합산소성분에 기인한 연소효율 개선의 효과라고 생각된다.

또한, 1000rpm 저부하의 경우 기관출력의 차이는 거의 없으나, 2000rpm 고부하의 경우는 최고출력이 약간 저하하는데, 이는 동일한 연료량을 공급시에 발생하는 발열량의 차이에 의한 것이라고 생각된다.

본 실험에서 현저한 매연 저감효과를 가지면서 NOx 배출량이 경유의 경우와 유사한 DGM 5%를 혼합한 경우에는 1%미만의 에너지 소비율 차이를 나타낸 것은 발열량이 저감되었음에도 불구하고 연소효율이 크게 개선된 것으로 생각할 수 있으며, 동시에 Fig. 2의 매연 배출량이 크게 저감된 것과 연관지어 생각할 수 있다.

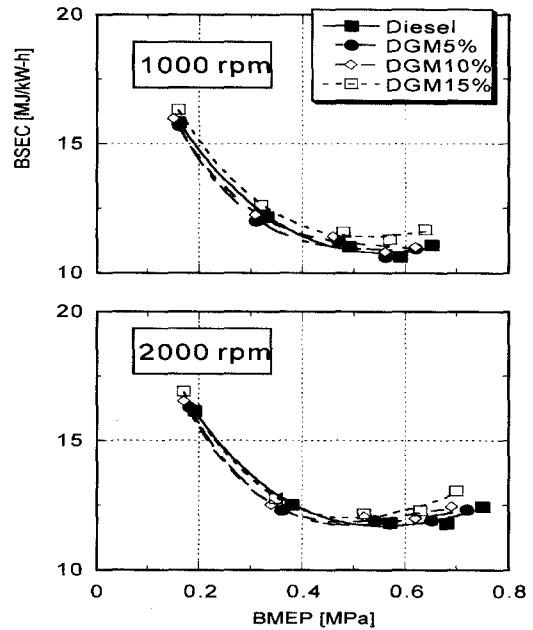


Fig. 4 Comparison of BSEC for difference of oxygenated fuel content under varying load and engine speed

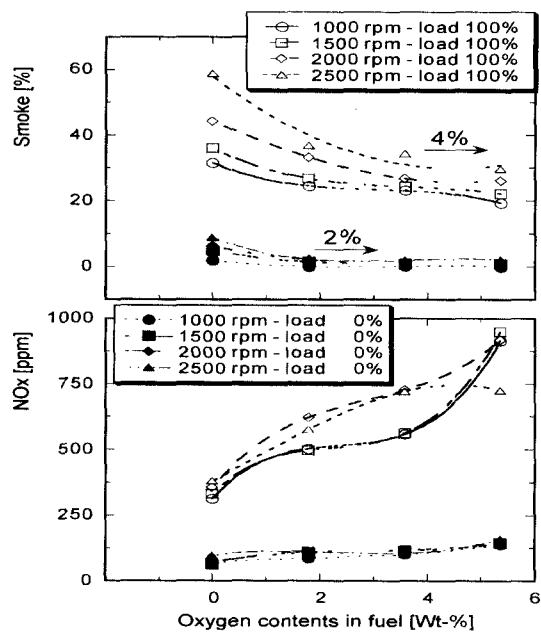


Fig. 5 Comparison of smoke density and NOx concentration of load 0% vs. full load with various oxygen contents

Fig. 5는 전부하와 무부하 상태에서 배출되는 매연과 NOx의 배출특성을 연료내에 함유된 산소농도와 비교하여 나타낸 것이다.

무부하 상태에서는 기관의 어느 회전영역에서나 DGM을 혼합한 모든 경우에 연료속의 산소농도가 2%이상만 되어도 매연 배출농도가 5% 미만임을 알 수 있다.

또한, 전부하 상태에서는 연료속의 산소량에 비례하여 매연량이 현저하게 저감되고, 저감폭도 고부하 · 고회전의 경우가 뚜렷함을 알 수 있을 뿐만 아니라 매연 저감효과가 저회전인 경우보다 고회전인 경우가 현저하였다.

연료속의 산소농도가 4% 이상이면 어느 회전 영역에서나 매연 배출량이 거의 30% 미만으로 나타나고 있으며, 그 이상의 산소농도가 첨가되어도 매연의 저감폭은 약간 감소함을 알 수 있다.

이는 디젤기관의 연소특성상 연료내의 산소가 흡입과정시 흡입된 공기속의 산소보다는 탄화수소와의 가연성 혼합기 형성이 빨라 거의 완전연소가 가능했기 때문으로 분석되며, 또한 Fig. 4의 에너지소비율이 큰 차이가 나지 않은 것 과도 다시 연관지어 생각할 수 있다.

무부하의 경우에 있어서는 산소농도가 증가함에 따라서 NOx의 배출량이 증가하는 것을 확인할 수 있었으나, 그 전체적인 배출량은 크지 않았다.

그러나, 전부하의 경우에 있어서는 연료내의 산소농도가 증가함에 따라서 NOx의 배출량도 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었으며, 이는 연료내에 포함된 산소에 기인한 연소효율 향상으로 연소실내의 온도를 빠르게 상승시켰기 때문으로 생각된다.

이상의 기관실험에서 전체적인 매연과 NOx 배출경향 및 에너지소비율의 관계를 검토한 결과, 경유와 유사한 에너지소비율을 유지하면서 현저한 매연저감효과를 나타내고 있는 DGM 5%를 경유 95%와 혼합한 경우에 가스 크로마토그래피를 사용하여 전체적인 탄화수소 및 C₁~C₆까지의 개별탄화수소를 비교 · 분석하여 보았다.

3.2 GC를 이용한 분석실험

Fig. 6은 1000, 1500, 2000 및 2500rpm의 기관회전속도에서 경유를 사용한 경우와 DGM을 5% 혼합하여 사용한 경우의 탄화수소 분석결과로서 크로마토그램상에 나타난 각각의 피크면적을 보여주고 있다.

그림에서 알 수 있는바와 같이, 양 연료 공회전과 고부하로 갈수록 탄화수소의 배출농도는 현저히 증가하며, 증가폭은 경유의 경우가 더욱 급격함을 알 수 있다.

이는 중부하 이하인 경우에는 경유를 연료로 사용한 경우에도 공기이용률이 충분하기 때문에 합산소연료인 DGM의 산소성분이 미연탄화수소 생성에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 생각되나, 합산소연료를 사용한 경우에 고부하 · 고회전수로 갈수록 DGM에 포함된 산소성분에 기인하여 연료 입자의 산화를 더욱 촉진시켜 매연 생성에 영향을 미치는 미연탄화수소의 전체적인 양이 크게 저감되었기 때문으로 생각된다.

Fig. 7은 경유와 DGM 5%를 첨가한 경우에서 저 · 중부하와 고부하영역에서 기관회전속도 변화에 따른 탄화수소의 배출특성을 나타내고 있다. 모든 회전범위에 걸쳐서 경유의 경우보다 합산소연료를 첨가한 경우가 탄화수소의 면적비가 현저하게 작게 나타나고 있으며, 특히 고부하로 갈수록 그 차이가 확실히 나타난다.

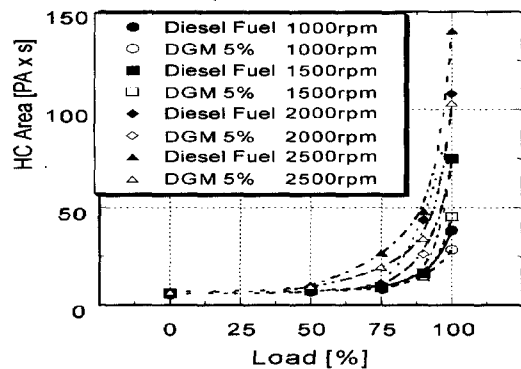


Fig. 6 Total area of hydrocarbon of two fuels on chromatogram analysis under varying engine speed and load

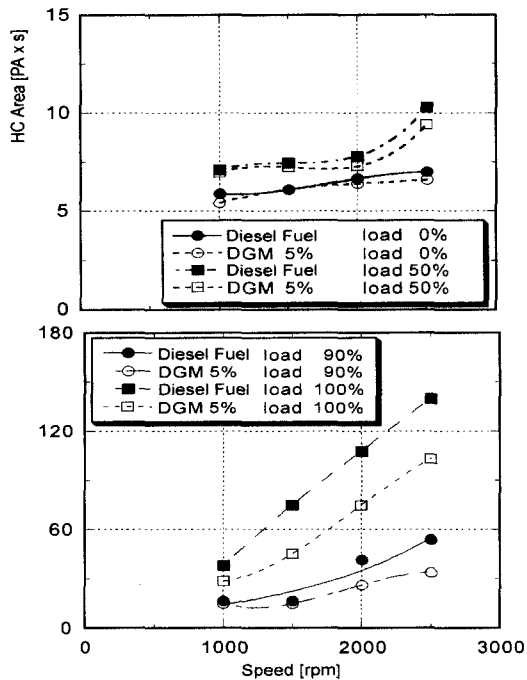


Fig. 7 Comparison of low vs. high load on total area of hydrocarbon under varying engine speed

무부하나 저부하인 경우에는 경유를 연료로 사용한 경우에도 기관의 특성상 디젤기관의 공기이용률이 충분하기 때문에 큰 영향을 보이지는 않고 있으나, 고부하에서는 전체적인 탄화수소의 면적이 합산소연료를 사용한 경우가 훨씬 감소하며, 그 이유는 합산소연료에 포함된 산소가 특히 연소 후반부에 기관의 공기이용률을 크게 높여 주어 탄화수소 성분의 산화를 촉진시키기 때문으로 생각된다.

이를 좀더 고찰해보면 디젤기관에서 배출되는 탄소상 미립자 즉, 매연은 Kittleson¹¹⁾ 등의 연구에 의하면 연소가 시작되는 즉시 매연이 발생되는 것이 아니고 확산연소 개시 때부터 매연이 생성되기 시작하며, 실린더내의 매연의 생성속도는 운전 조건에는 별 영향이 없고, 피크 농도에도 크게 영향을 미치지 않는다고 보고하고 있어 연소 후반부에 디젤기관의 공기이용률이 매연 생성에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 기관부하가 50%인 중부하상태의 경

유 개별탄화수소를 분석한 결과를 나타낸 것으로, C₁(methane)과 C₂계열의 저비등점 탄화수소를 제외한 모든 경우에 있어서 경유의 경우가 다소 증가하는 추세를 보이고 있으나, 그 차이는 미미하였다.

Fig. 9는 전부하 상태에서 개별 탄화수소를 분석한 경우로서, C₁을 제외한 모든 경우에 있어서 합산소연료를 사용한 경우가 탄화수소가 대폭 저감되어 배출되고 있음을 나타내고 있다. 연소 과정에서 필연적으로 발생하는 열분해는 탄화수소 연료를 분해하여 매연성분의 핵을 형성시키게 되는 것으로 알려져 있다.¹⁰⁾ 이때 발생하는 미연 탄화수소의 성분중에서 저비등점 탄화수소는 산화가 용이하여 매연 생성에 큰 영향을 미치지 못하지만, 고비등점 탄화수소는 산화가 용이하지 못하며 매연 생성에 커다란 영향을 미치는 것으로 생각된다.

일반적으로 알려진바와 같이, 매연 배출은 후연소에 의한 매연의 산화보다 근본적으로 매연 생성이 적어야 되는 것으로 알려져 있다. 즉, 매연 배출은 매연의 산화량보다 매연의 생성량이 더 지배적이라고 할 수 있다. 합산소연료를 사용한 경우에는 연료내에 산소 성분이 일정 부분 점유하는 부분이 있어, 연료 자체내에 탄화수소 성분이 경유를 사용한 경우보다 적게 된다.

다시 말하면, 매연의 생성 자체를 연소과정 전반에 걸쳐서 억제할 수 있을 것으로 생각된다.

또한, 확산연소가 대부분인 후연소기간에는 산소 성분의 기여로 인해 빠른 연소, 즉 급격한 탄화수소의 산화를 유도하여 매연생성을 더욱 억제할 수 있는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 90%의 고부하상태에서 매연과 각 탄화수소와 상관관계를 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 90%의 부하에서 DGM을 혼합한 모든 경우에 비하여 경유의 경우는 매연이 선형적으로 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

특히, C₁과 같은 저비등점 탄화수소는 뚜렷한 매연 배출과의 관계가 나타나지 않았지만, C₃와 C₆의 고비등점 탄화수소는 위의 매연 배출성향

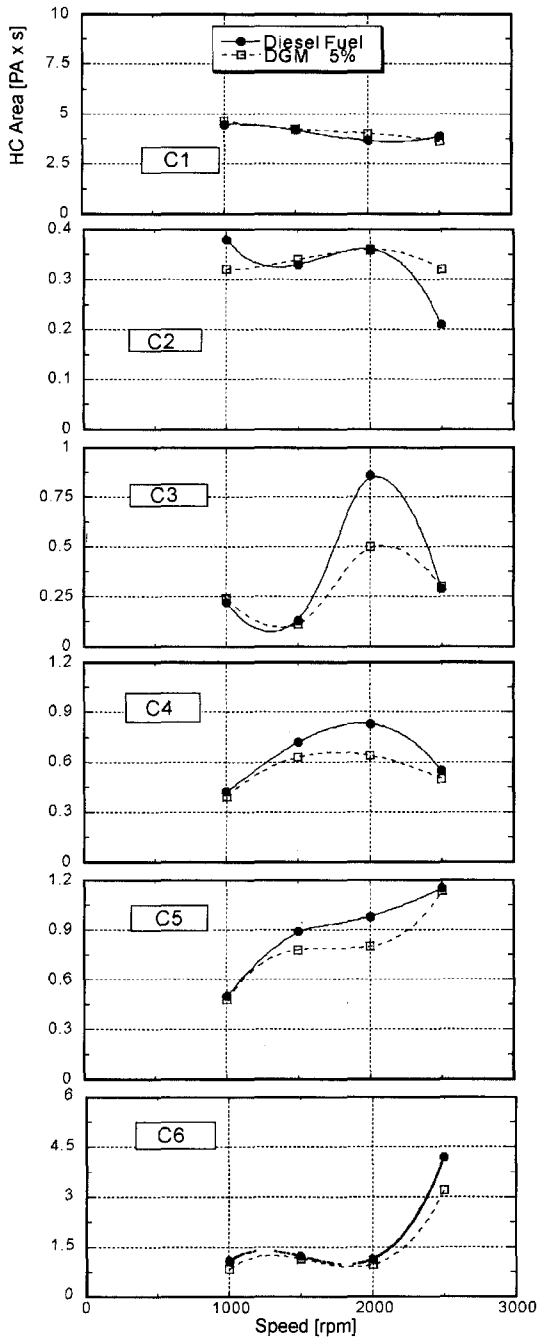


Fig. 8 Area of each hydrocarbon on chromatogram analysis under varying engine speed at load 50%

과 유사하게 나타난 것을 알 수 있다.
이는 Fig. 2의 전체적인 매연 배출 특성과 유

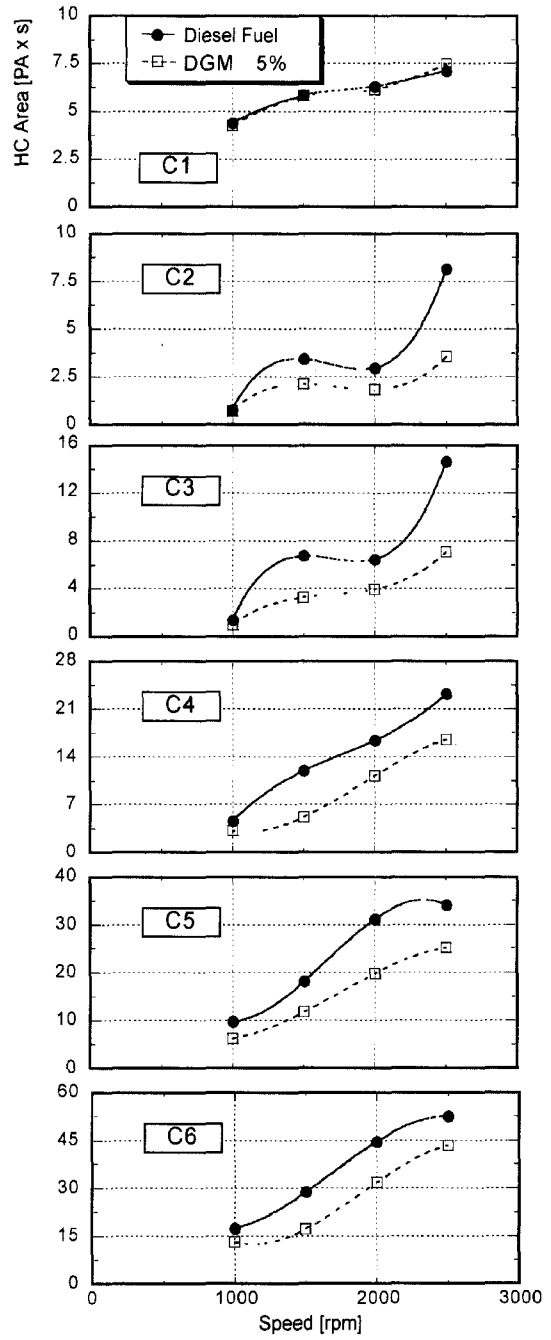


Fig. 9 Area of each hydrocarbon on chromatogram analysis under varying engine speed at full load

사한 관계를 보이고 있어 매연배출농도에 고비
등점 탄화수소의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

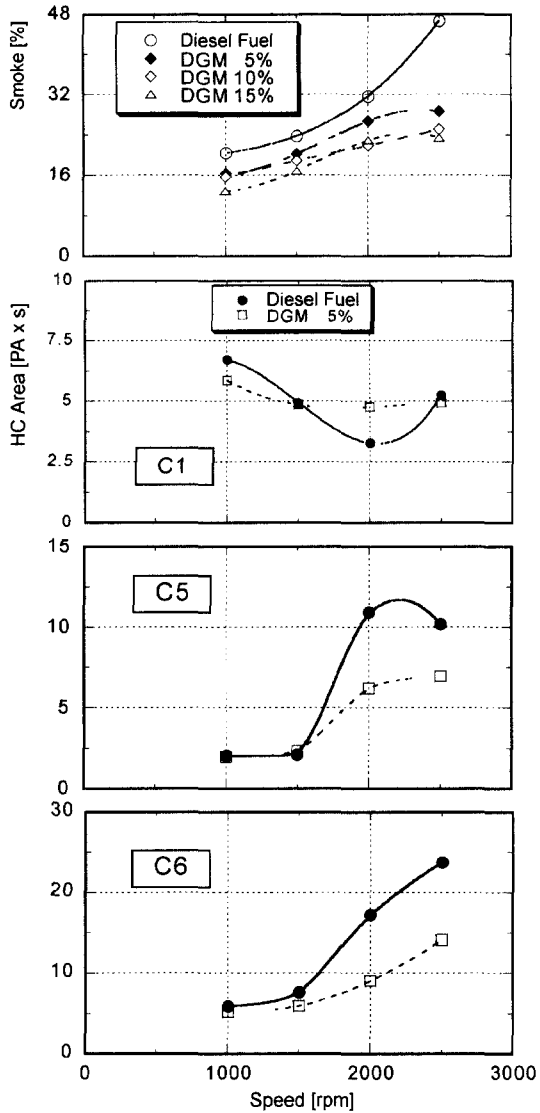


Fig. 10 Relationship of smoke and hydrocarbon for low vs. high boiling point at load 90%

4. 결론

수냉식, 4행정, 직접분사식 디젤기관의 연료로서 경유와 합산소연료인 DGM을 혼합하여, 이들 연료들이 기관 성능 및 배기 배출물에 미치는 영향과 가스 크로마토그래피를 이용하여 탄화수소 배출에 대하여 조사한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 전체적인 THC나 매연 측정에 그치지 않고,

배기배출물 중에 포함된 미연탄화수소의 정량적 분석이 가능하였고, 고비등점 탄화수소가 매연 배출농도에 직접적으로 영향을 미치는 것을 확인하였다.

2) 매연 배출특성은 고비등점 탄화수소의 생성 및 산화와 밀접한 관계가 있으며, DGM과 같은 합산소연료는 고부하와 고회전 영역에서 연료 입자의 산화를 촉진시켜 매연 배출을 현저하게 억제하였다.

3) 합산소연료를 상용 연료인 경유와 일정 비율로 혼합하여 디젤기관의 연료로 사용할 경우, 연료내에 함유된 산소량이 2%정도만 유지되어도 현저한 매연 저감 효과가 있음을 알 수 있었으며, 5~6% 이상의 산소량이 첨가되어도 매연 저감폭은 둔화되었다.

참고 문헌

- 1) 小森正憲, 辻村欽司, “高壓燃料噴射によるディーゼルの機関の燃焼改善, 排出物の低減”, 日本自動車技術會 シンポジウム, No. 8, 1990.
- 2) 石渡宏, “高壓噴射のタイミング, 送油率の制御”, 日本自動車技術會 シンポジウム, No. 8, 1990.
- 3) 岩本正和, “觸媒による含酸素化物の低減”, 日本自動車技術會 シンポジウム, No.8, 1990.
- 4) 吉田清英, “觸媒によるNOx, 吐煙の同時低減”, 日本自動車技術會 シンポジウム, No. 8, 1990.
- 5) B. L. Edgar, R. W. Dibble, D. W. Naegeli, “Autoignition of Dimethyl Ether and Dimethoxy Methane Sprays at High Pressures,” SAE 971677, 1997.
- 6) T. Murayama, T. Chikahisa, Y. T. Oh, M. Zheng, Y. Fujiwara, S. Tosaka, M. Yamashita, H. Yoshitake “Simultaneous Reductions of Smoke and NOx from a DI Diesel Engine with EGR and Dimethyl Carbonate,” SAE 952518, 1995.
- 7) 오영택, 최승훈, “디젤엔진에서 DMC를 사

- 용한 경우의 배기가스의 농도분석에 관한 실험적 연구,” 자동차공학회 논문집, 제8권 제2호, pp.1-8, 2000.
- 8) C. Bertoli, N. D. Giacomo, C. Beatrice, “Diesel Combustion Improvement by The Use of Oxygenated Synthetic Fuels,” SAE 972972, 1997.
- 9) 登坂 茂, 藤原康博, “ディーゼル機関排出微粒子の生成に及ぼす燃料性状の影響,” 日本機械學會 論文集, 55卷 509号, 1989.
- 10) 한성빈, 문성수, 이성열, “디젤기관의 스모크 배출의 확산연소 의존성에 관한 연구,” 대한기계학회 논문집, Vol.18, No.2, pp. 397-404, 1994.
- 11) D. V. Kittleson, M. J. Piphon, J. L. Ambs, L. Luo, “In-cylinder Measurement of Soot Production in a Direct-Injection Diesel Engine,” SAE 880344, 1988.