

Diesel 機關의 微粒子와 NO_x 同時低減에 관한 研究

오 영 택*

(1997년 11월 11일 접수)

A Study on the Simultaneous Reduction of PM and NO_x Emissions in Diesel Engines

Young Taig Oh

Key Words : PM(미립자), Oxygenated Fuel(함산소 연료), EGR(배기가스재순환), Exhaust Emissions(배기배출물), Thermal Cracking(열분해)

Abstract

Recently, the automobile industry has been faced with very serious problems related to the very restricted regulations of exhaust gas emissions. Therefore many researchers have been attracted to the development of oxygenated fuel for a solution to these problems. This paper deals with the effects of oxygenated fuel on exhaust emissions. An experimental study was conducted to investigate PM and NO_x emission using dimethyl carbonate as an oxygenated fuel in a naturally aspirated DI diesel engine. With increased oxygenated fuel amounts, there were significant reductions in PM, HC and CO emissions mainly from depressed thermal cracking, while little increase in NO_x was encountered concurrently. The effective reduction in PM with oxygenated fuel was maintained with the presence of CO₂, which suggested low NO_x and PM obtained from the combination of using oxygenated fuel and cooled EGR. Thermal cracking and an analysis of the heat release rate were also studied in the experiment.

1. 서 론

대기환경정화의 관점에서 연료, 특히 경유를 사용하는 디젤엔진의 배기가스중 PM과 질소산화물의 저감 및 이들의 기술에 관하여는 여러 의견이 제시되고 있다. 즉, 현재의 엔진기술은 물론, 배기가스의 후처리 기술 또는 대체 연료의 이용, 경유 성상의 적합성등 다각적인 연구가 진행되고 있지만, 이들을 종합적으로 생각해 볼 때 열효율이 높은 디젤엔진의 특징을 살리면서 매연, NO_x 등을 저감시키기 위한 연소개선이 절실히 필요하다. 그

대책들중의 하나로 연료 자체의 개량을 들 수 있는데, 이것은 산소를 혼입한 경유(0~100%, 함산소 연료)를 사용하는 것으로, 함산소연료란 적당한 산소를 연료자체속에 포함시켜 연료의 원소구성비를 조정하는 것으로 이를 기관연료로 사용하여 PM과 NO_x등 배출가스의 개선을 시도하고자 한 것이다.

디젤기관의 배기가스를 저감시키기 위하여 지금까지는 새로운 연소기술 접목 및 초고압 분사⁽¹⁻³⁾ 등의 방법들이 주로 시도되지만, 연료자체에 의한 연구는 미흡한 상태이다. 일부에서 알콜⁽⁴⁾이나 동식물연료^(5,6)를 이용하려는 시도도 다각적인 측면에서 연구되고 있으며, 알콜은 30~50%, 동식물유는 10%전후의 산소를 포함하고 있어, 디젤기관의 배기저감을 위하여 산소의 유용성을 어느 정도 입

*회원, 전북대학교 기계공학과, 자동차신기술연구소

증한 바도 있다. 디젤기관에서 새로운 연소기술의 접목이나 초고압 분사방법 등을 적용하는 것은 정교한 분사장치가 필요하게 되고, 가격이 상승하며 마찰저항이 증가하는 등의 부작용이 크기 때문에 본 연구에서는 기존의 디젤기관을 개조없이 매연생성을 억제하기 위하여 연료가 액체나 기체에 관계없이 연료속에 산소를 함축시켜 연료속에서부터 매연의 생성가능성을 억제시키고자 한 것이다. Kittleson등⁽⁷⁾은 연소가 바로 시작하여도 매연은 생성되지 않고 확산연소가 시작되면서 매연도 생성되기 시작한다고 보고하고 있다.

미립자는 주로 매연(탄소상태의 미립자)과 SOF(가용성 유기물질)로 구성되며 고부하시에는 매연이 주체이다. 디젤기관에서 배출되는 탄소상 미립자, 즉 매연은 연료성분이 열분해하여 생성된 탄소성분이 응집하여 생성되는 것이지만 생성된 탄소상 미립자의 대부분은 실린더 속의 고온상태에서 잔존하는 생성량과 산화량의 차이라고 할 수 있다. 실린더내 매연의 생성속도는 운전조건에는 별다른 영향을 받지 않고 거의 일정하며, 발생 피크농도도 크기는 영향받지 않으며, 운전조건에 따라서 다른 점은 매연의 생성시기와 산소농도에 의한 생성된 매연의 산화정도라는 보고가 있다.⁽⁷⁾

따라서, 본 연구에서는 연료자체속에 포함된 산

소를 이용하여 연소속도를 빠르게 하고 그을음의 배출 피크농도는 전진시키며, 특히 주위 공기에서 공급하는 연소 후반부의 부족한 산소량은 연료 자체에서 공급함으로써 배기배출물 특히 매연의 저감을 시도하고자 하였다. 한편, 산소량의 증가로 thermal NO_x로 인한 NO_x농도의 증가가 예상되나, 이를 저감시키기 위한 가장 유력한 방법으로 알려져 있는 EGR^(8,9)방법도 병행하여 실시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 수냉식, 4행정, 직접분사식 디젤기관으로, 행정체적 826 cm³, 압축비 18.5, 직경 100 mm, 행정 105 mm, 분사압력은 21.3 MPa이며 연료분사시기를 임의로 조절할 수 있도록 하였고, 연소실내의 압력 및 분사시기를 오실로스코프로 모니터하면서 컴퓨터에 기록하여 연소실내의 압력을 구하고, 그 압력을 이용하여 열발생율을 구하도록 하였다.⁽⁴⁾

또한, 배기가스중 NO_x를 저감시킬 실험장치로서 EGR 방법을 병행하였는데, EGR방법은 Fig. 1에 표시한 바와 같이 배기관에 나비밸브를 설치하여 배기관내의 압력을 조절하므로써 EGR율을 조

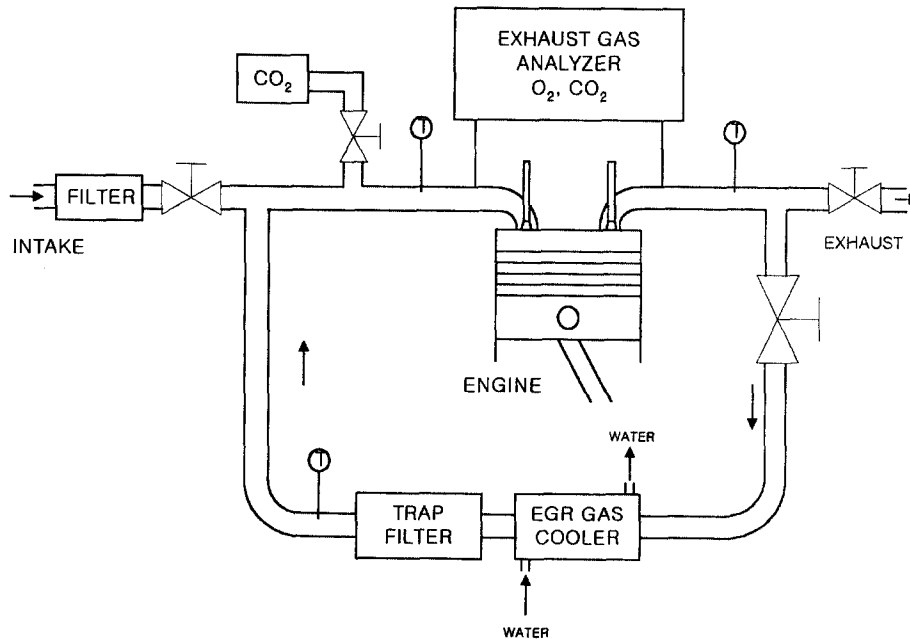


Fig. 1 Experimental apparatus of EGR.

절하도록 하였으며, EGR을 위한 배기가스 온도를 흡기온도와 같게하기 위해서 냉각수로 냉각시켰으며(cooled EGR), 배기가스의 매연을 제거하여 흡기에 공급하기 위하여 필터를 설치하였다. 한편, EGR율의 측정은 배기관 및 흡기관에서 각각 측정된 CO_2 및 NO_x 가스 농도를 이용하여 실행하였다. 실험에 사용한 연료는 디젤기관에서 통상 사용하는 경유와 합산소 연료를 체적비로 0~20%까지 혼합한 연료를 사용하여 기관회전속도 1500 rpm, 1800 rpm의 경우, 연료분사시기와 기관부하를 변화시켜 실험하였다.

연료분사시기는 $4^\circ\text{CA}\sim 17^\circ\text{CA}$ BTDC 범위에서 실험조건에 따라 최적시기를 선정하였으며, 기관부하는 전부하 범위에서 실행하였고, 특히 배기가스 배출농도가 농후한 고부하 영역에서 주로 실행하였다.

실험에 사용된 연료의 특성을 Table 1에 표시하였다.

DMC(dimethyl carbonate, 합산소연료)혼합연료의 세탄가는 직접 측정은 하지 않았지만, 실험결과 열발생율선도로 판단할 때 합산소연료 15%를 혼합한 경우에도 착화지연시간은 거의 변화가 없어 합산소연료의 혼합량이 혼합연료의 착화성에는 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 한편, 실험조건이 변경될 때마다 각 연료 똑같이 냉각수, 윤활유, 연료 등의 온도를 일정하게 유지하였으며, 연료 공급계통, 연료필터 및 연료탱크 속의 모든 연료를 완전히 교체하고, 전실험이 다음 실험에 영향을 미치지 않도록 충분한 시간동안 기관을 운전한 후 실험을

실시하였다.

실험연료의 열분해는 열분해장치(島津 PYR -24형)를 이용하였으며, 시료를 백금포트에 놓아 석영관내에서 가열하는 것이며, 석영관이 들어있는 열분해로의 온도는 상온에서 $850\pm 1^\circ\text{C}$ 까지로 임의로 설정할수 있도록 하였다. 열분해된 성분을 분석하기 위하여 가스크로마토그래프(GC-6APTF)를 사용하였으며, 열분해장치와 조합하여 사용하였다. 이때 분석용 칼럼은 연료의 열분해 성분인 저비등 점성분, 또 중·중합성분인 고비등점 성분까지의 탄화수소를 명확하게 분해하기위하여 무극성 유리 캐필러리 칼럼(실리콘OV-101, 30 cm)을 사용하였고, 저비등점 탄화수소 분석용 칼럼은 Porapak Q를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

합산소연료의 이론공연비는 경유의 것과는 차이가 있어 10%의 합산소연료를 첨가함으로써 이론공연비를 6%정도 저하시킬수 있다. 이에따라서 혼합연료의 에너지밀도 차이에 의한 연료공급량이 차이가 생기므로 연료분사시기에 따라 기관성능 및 배기배출 특성에 대하여 조사하였다. 우선, 합산소혼합연료의 경우 기관회전속도 1800 rpm, BMEP 0.535 MPa에서 연료분사시기가 배기가스 배출특성에 미치는 영향을 조사한 결과를 Fig. 2에 표시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 경유에 합산소연료를 첨가하므로써 매연, CO 및 HC는 전분사시기에 걸쳐 배출특성이 개선된 반면, NO_x 는 약간 증가함을 알 수 있다. 특히, 연료분사시기가 지연됨에 따라서 매연은 증가하는 반면 NO_x 는 저감하는 전형적인 상관관계이며, 합산소연료를 사용함에 따라서 매연의 저감율이 NO_x 의 증가율보다도 현저하였다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 실험조건에서 열효율과 정미연료소비율 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 열효율은 거의 동일하나 연료소비율이 약간 악화된 것처럼 보이지만, 합산소연료의 경우 발열량이 적기때문에 BSFC의 단위를 혼합연료의 에너지 밀도인 $[\text{J}/\text{Kw}\cdot\text{h}]$ 로 환산하면 연료소비율의 악화는 미세한 것으로 판단된다. 양 그림에서 알 수 있듯이 연료소비율 및 열효율은 거의 동일하며 매연, CO 및 HC를 현저히 저감시킬 수 있음을 알았으며, 연료소비율 측면에서 최적분사시기는 $10\sim 12^\circ\text{CA}$

Table 1 Properties of test fuels.

	Dimethyl carbonate	Diesel fuel
Molecular formula	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$	$\text{C}_{16}\text{H}_{34}$
C : H : O by mass	6 : 1 : 8	5.7 : 1 : 0
Stoichiometric air fuel ratio	1 : 3.51	1 : 14.9
Molecular weight	90	226
Density (kg/m^3)	1.0706	0.8054
Heating value $[\text{MJ}/\text{kg}]$	15.780	43.12
Flashing point ($^\circ\text{C}$)	17	48
Oxygen content (%)	53	0
Cetane number	-	51

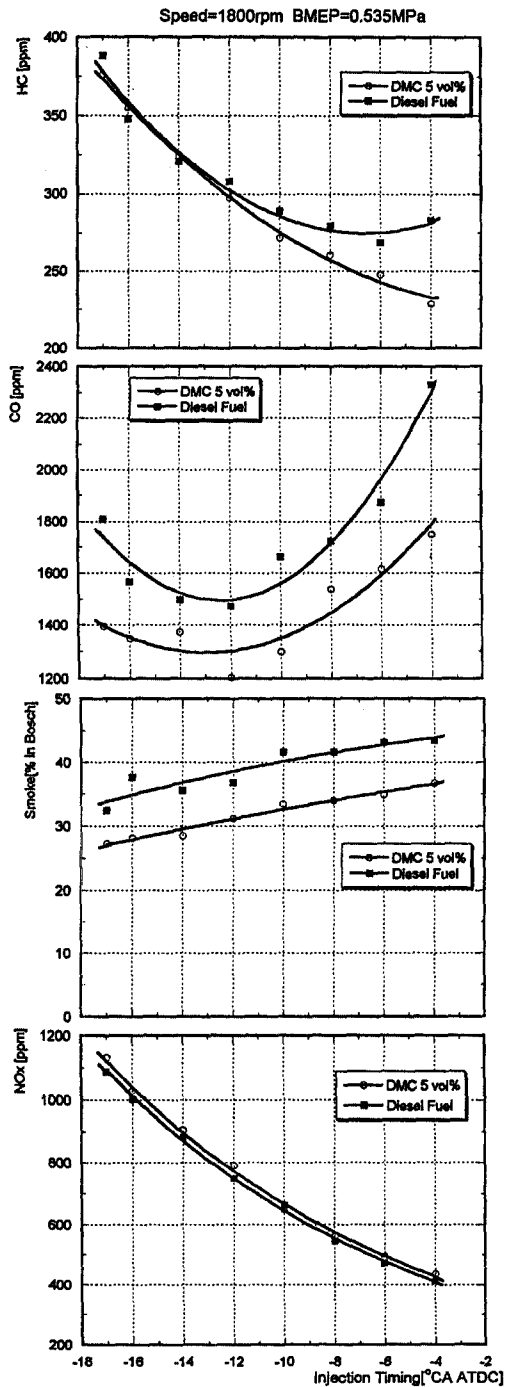


Fig. 2 The effect of injection timing on characteristics of exhaust gas emissions.

BTDC로 하였다.

또한, 합산소 연료의 첨가량이 배기가스 배출특

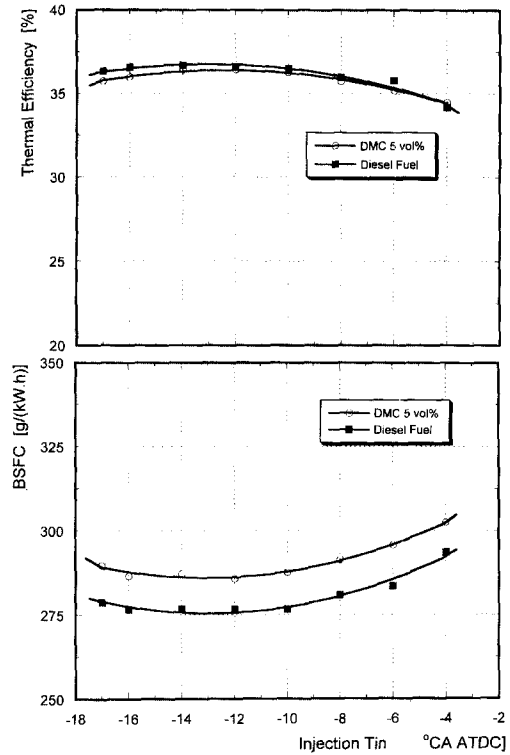


Fig. 3 The effect of injection timing on the thermal efficiency and BSFC.

성에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 4는 기관회전속도 1800 rpm, 분사시기 10°CA BTDC, BMEP 0.535 MPa에서 합산소연료량의 변화가 배기가스농도에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 합산소연료 첨가량을 5%, 6.5%, 8%, 10% 및 12vol%로 하였다.

그림에서와 같이 합산소량이 증가함에 따라서 매연, HC 및 CO는 현저히 감소하지만 NO_x는 역으로 증가하였다. 이는 연료 속의 산소량의 증가로 혼합기의 연소가 촉진되어 매연, HC 및 CO는 감소되나, NO_x는 그 배출 특성인 thermal NO_x에 기인하여 증가된 것으로 생각된다. 이들을 종합해볼 때 합산소량은 8~10%가 적당할 것으로 판단된다.

다음은 기관의 부하변화가 배기가스 배출농도에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. Fig. 5는 연료 분사시기 10°CA BTDC, 기관회전속도 1500 rpm의 경우 경유와 합산소연료 첨가량 5%와 10%의 혼합 연료를 이용하여 실험한 결과이다.

그림에서 알 수 있듯이 매연과 CO의 저감효과는 고부하영역에서 또 합산소량이 큰 쪽이 현저하여 BMEP 0.535 MPa에서 합산소첨가량 10%의 경우

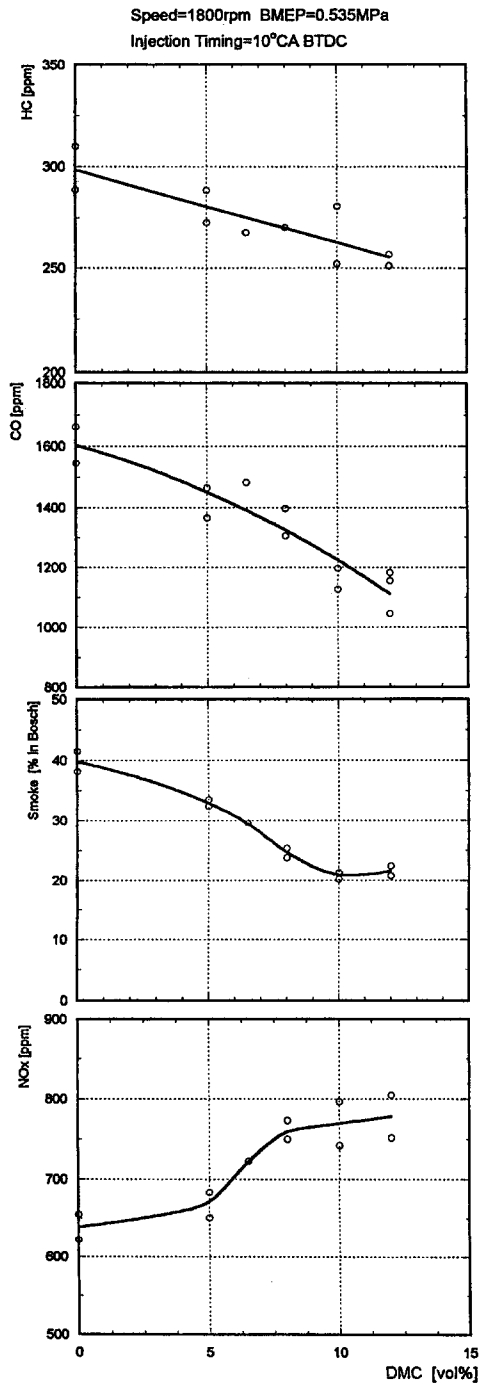


Fig. 4 The effect of DMC increasing rate on smoke and NO_x emissions.

는 매연과 CO농도는 50%정도 저감하였다. HC은 전반적으로 감소하였지만 큰 차이는 없었으며,

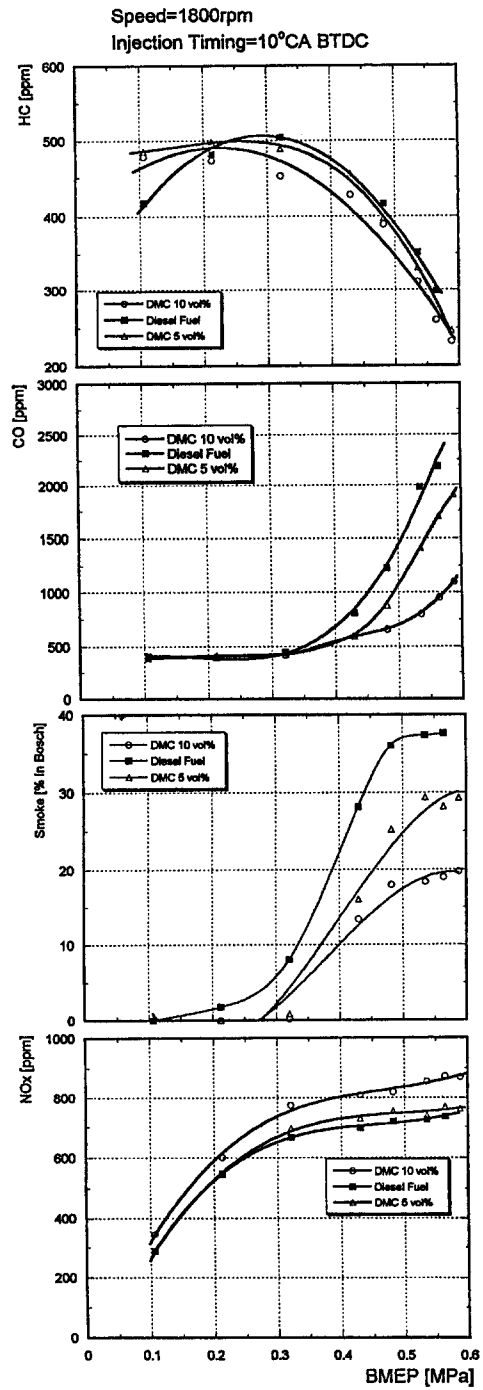


Fig. 5 The effect of engine load on characteristics of exhaust gas emissions.

NO_x는 고부하영역에서 함산소량이 증가할수록 증가하였으나, 매연과 CO의 감소율보다는 NO_x증가

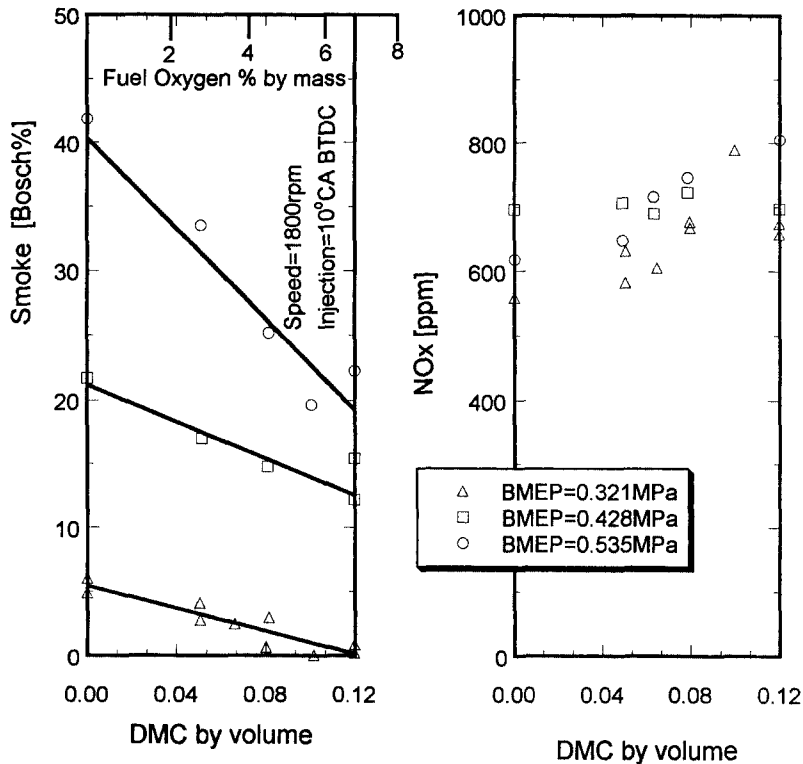


Fig. 6 The effects of DMC concentration on smoke and NO_x emissions.

율은 현저히 적었다.

Fig. 6은 Fig. 5의 매연과 NO_x에 관한 자료를 재정리한 것으로, 연료 속의 함산소량의 변화가 서로 상반된 배출특성을 갖고있는 매연과 NO_x생성에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 저부하(0.321MPa)인 경우보다 고부하(0.535MPa)의 경우가 함산소연료의 혼합 목적인 매연의 감소폭이 현저하였으며, NO_x는 전반적으로 약간 증가한 것으로 나타나 매연생성은 연료 속의 함산소량에 직접적인 관계가 있음을 확인하였다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 함산소연료를 첨가함으로써 NO_x의 배출농도는 약간 증가하는 반면 매연과 CO는 특히 고부하영역에서 현저히 저감시킬 수 있음을 확인하였으며, 특히 매연저감을 위해서는 매우 유효한 방법임을 입증하였다.

매연은 연료분자가 열분해반응에 의하여 저탄소화한 후에 그 일부가 탈수소 중합반응에 의해 다환화(벤젠구조)하여 이들이 성장하여 생성되는데, 이는 연소초기에 주위로부터 공기화산이 충분하지 못하여 연료의 열분해가 진행되기 때문으로 알려져

있다.⁽¹⁰⁻¹³⁾

이같은 이유를 조사하기 위하여 경유와 함산소연료의 열분해반응(thermal cracking), 연소 실내의 열발생율 곡선을 비교하여 보았다.

Fig. 7은 경유와 함산소연료의 열분해 과정을 나타낸 것이다. 그림에서와같이 경유의 경우는 다환화된 탄소구조가 함산소연료보다 다량 검출되어 매연배출농도가 큰 것으로 판단되며 함산소연료는 연료분자속에 산소가 존재하기 때문에 이 산소가 균일하게 모든 연료부분에 공급되어 열분해에 의한 저탄화수소의 생성량을 감소시켜 매연의 생성량이 감소된 것으로 생각된다. 또, 이 열분해의 억제제로 HC가 감소한 것이며, CO의 저감은 연료분자속에 산소가 존재하여 산화작용이 촉진되었기 때문으로 생각한다.

한편, Fig. 8은 1800 rpm, 10°C A BTDC, BMEP 0.535 MPa에서 열발생율곡선을 비교한 것으로, 함산소연료를 첨가함으로써 착화지연기간은 동일하지만, 예혼합연소량이 경유보다 많아 열발생율의 최고값이 높아지고, 이 최고값도 전진되어지며, 연소

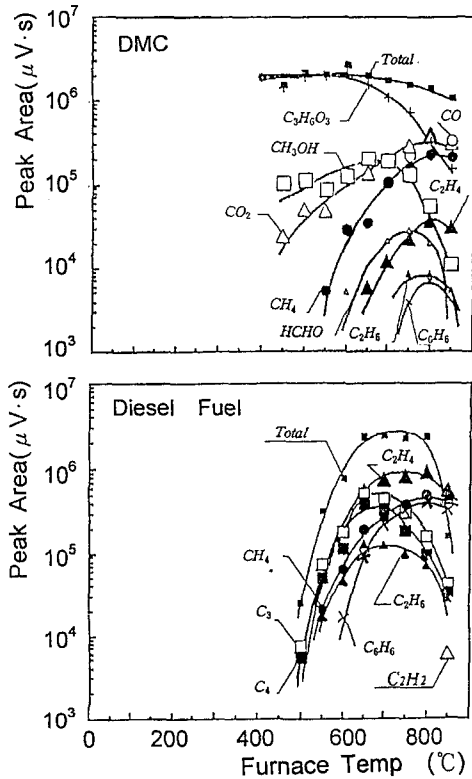


Fig. 7 Thermal cracking process of DMC and diesel fuel.

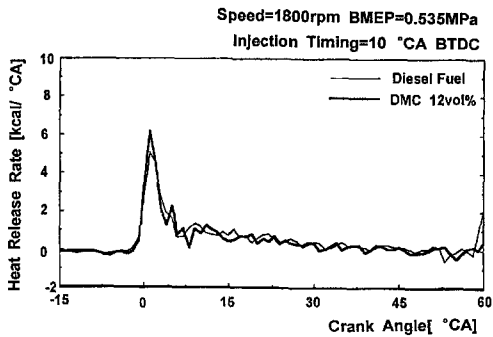


Fig. 8 Comparison of the rate of heat release.

온도가 높게 나타난 것으로 판단할 때 연소개선에 의하여 매연과 CO가 현저히 저감되고, NOx가 약간 증가한 것으로 생각된다. 또한, 정용연소장치를 이용하여 연소 가시화 실험결과도 합산소연료의 경우가 휘염의 광량이 감소하였는데, 이는 합산소연료의 첨가로 매연 생성량이 감소하여 매연에 의한 발광이 작아졌기 때문으로 생각된다.

이에 대하여 좀더 고찰을 해보면 디젤기관에서

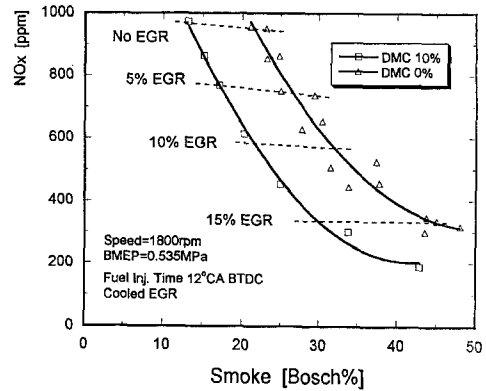


Fig. 9 The effect of combination of DMC and EGR on smoke and NOx emission.

배출되는 탄소상미립자 즉, 매연은 연료성분이 열분해하여 발생한 탄소성분이 응집하여 생성되지만, 생성된 탄소상 미립자는 대부분 실린더내 고온분위기 중에서 잔존하는 산소에 의해 산화하는 것으로 생각된다. 즉 기관에서 배출되는 매연은 생성량과 산화량의 차이라고 할 수 있다.

특히, Kittleson⁽⁷⁾ 등의 연구에 의하면 연소가 시작되는 즉시 매연이 발생하는 것이 아니고 확산연소개시 때부터 매연이 생성되기 시작하며, 실린더내의 매연의 생성속도는 운전조건에는 별 영향이 없고, 피크농도에도 크게 영향을 미치지 않는다고 보고하고 있다. 저부하시에 생성된 매연은 85%이상이 산화소멸되지만, 고부하시에는 20~40%밖에 산화소멸되지 않으며, 고부하시에는 매연의 생성시기가 늦게 되는 것과 산소농도가 낮기 때문에 산화속도가 늦게 되어 충분히 산화가 끝나지 않은 상태에서 배출시기가되어 방출되므로 매연농도가 높은 것으로 알려지고 있다.

따라서, 합산소연료를 첨가함으로써 매연과 CO 농도의 대폭적인 감소는 다음과 같은 이유로 생각된다. 즉, 실린더내의 피크매연의 농도는 연료 성분의 열분해에 의한 매연생성과 생성된 매연의 산화소멸의 차이이므로, 고부하시 연소초기에 주위로 부터 공기확산이 적으면 연료의 열분해가 활발히 진행되는데 합산소연료 첨가로 연료 속에서도부터 산소가 확산공급되므로 열분해반응이 억제되어 매연 발생원인인 저탄화수소의 생성을 감소시킴에 따라 연소속도가 빠르게되어 연소실내에 공급된 연료가 빨리 소비되므로 당연히 매연의 피크농도는 사이클의 전반부로 이동된다. 따라서 매연이 산화소멸되

는 시간이 길게되어 매연배출량이 감소한 것으로 생각된다.

이상 언급한 바와 같이 합산소연료를 첨가함으로써 배기가스중에 매연, HC 및 CO를 크게 저감시킬 수 있었으며 특히, 매연의 저감은 현저하였으나, 부수적으로 NO_x의 배출농도는 약간 증가하였다. 이같은 문제를 해결하기 위하여 디젤기관에서 NO_x 저감의 가장 유력한 방법으로 알려져있는 EGR 방법을^(8,9) 병행하여 사용하였다.

Fig. 9는 경유와 합산소연료10% 혼합한 연료에 각각 EGR 방법을 병용한 경우의 실험결과이다. 그림에서와 같이 배기 재순환량에 따라서 NO_x를 50%정도 저감시킬 수 있었으며 배기재순환율은 고부하의 경우 약 20%정도까지 가능하였다. 고부하 영역의 경우 완전연소를 위하여 산소의 유효이용은 매우 중요하며 EGR율이 증가할수록 산소농도는 감소하므로 확산연소는 전반적으로 악화되는 것으로 생각한다.

그림에서 알 수 있는 것처럼 EGR방법과 합산소연료를 동시에 조합하여 사용함으로써 서로 배출 특성이 상반된 NO_x와 매연을 동시에 상당히 저감시킬 수 있다. 즉 합산소연료를 사용함으로써 대폭적인 매연감소량을 EGR을 병행함으로써 매연 감소폭이 둔화된 반면 NO_x량을 대폭 감소시킬 수 있어, 이 두가지 배출가스를 동시에 저감시킬 수 있음을 확인하였다.

따라서, 서로 상반된 배출 특성을 가지고 있는 매연과 NO_x를 동시에 저감시키기 위해서는 합산소연료와 EGR방법을 동시에 사용하는 것이 최선의 방법이라 생각한다.

4. 결 론

디젤기관에서 서로 상반된 배출 특성을 갖고 있는 매연과 NO_x를 동시에 저감시키는 것은 디젤기관 배기개선을 하는데 매우 곤란한 문제이지만, 본 실험에서 합산소연료 및 EGR방법을 병행하여 사용함으로써 매연과 NO_x의 동시저감 가능성을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기관 운전 조건에서 배기가스 배출 특성은 분사시기를 전진시킬수록 매연은 감소하고, NO_x는 증가하였으며, 이 경향은 합산소연료의 증가에 따라 절대량은 감소하지만 배출 경향은 유사하였다.

(2) 매연은 연료 속의 산소농도와 직접적인 관계가 있으며, 합산소연료의 농도가 증가할수록 직선적으로 감소하며, 10%의 합산소연료를 첨가함에 따라서 35~50%의 매연저감효과 및 합산소연료의 증가에 따라 NO_x는 약간 증가되는 반면 HC와 CO는 현저히 감소되었다.

(3) 배기 재순환 방법과 합산소연료를 조합한 실험에서 NO_x와 매연을 동시에 저감시킬 수 있었다.

(4) 합산소연료와 경유를 고온 질소 분위기 속에서 열분해 실험한 결과 합산소연료가 저탄화수소의 발생을 억제하며 매연 배출농도 저감에 기인한 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 1996년 교육부 학술연구조성비(기계공학분야 : ME96-F-08)에 의해서 연구되었음.

참고문헌

- (1) Shigeru Shundoh, Komori, M. and Tsujimura, K., 1992, "NO_x Reduction from Diesel Combustion Using Pilot Injection with High Pressure Fuel Injection," *SAE Trans.* 920461.
- (2) Shigeru Shundoh, Kakegawa, T. and Tsujimura, K., 1991, "The Effect of Injection Parameters and Swirl of Diesel Combustion with High Pressure Fuel Injection," *SAE Trans.* 910489.
- (3) 柳原弘道, 1995, 混合氣形成と燃焼特性の排氣へ及ぼす影響, 新世代ディーゼル燃焼システムの創造, NO. 9501 Symposium, 일본자동차기술회.
- (4) 노상순, 허병무, 1987, "소형디젤기관에 있어서 알콜이용에 관한 연구," 대한기계학회논문집 제11권, 제3호, pp. 386~394.
- (5) Murayama, T., Oh, Y. T., Kido, A., Chikahisa, T., Miyamoto, N. and Itow, K., 1986, "Effect of Super Heating of Heavy Fuels on Combustion and Performance in D. I. Diesel Engines," *SAE Trans.* 860626.
- (6) Murayama, T., Oh, Y. T., Miyamoto, N., Chikahisa, T., Takemi, N. and Itow, K., 1984, "Low Carbon Flower Buildup, Low Smoke, and Efficient Diesel Operation with Vegetable Oils by

- Conversion to Mono-Esters Blending with Diesel Oil or Alcohols," *SAE Trans.* 841161.
- (7) Kittleson, D. V., Piphon, M. J., Ambs, J. L. and Luo, L., 1988, "In-Cylinder Measurements of Soot Production in a Direct-Injection Diesel Engine," SAE Paper 880344.
- (8) Uchida, N., Daiho, Y., Sato, T. and Sugano, H., 1993, "Combustion Effects of EGR and Supercharging on Diesel Combustion and Emissions," SAE Paper 930061.
- (9) Plee, S. L., Ahand, T. and Myers, J. P. 1981, "Flame Temperature Correlation for the Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Particulate and NO_x Emissions," SAE Paper 811195.
- (10) 廣安 博之, 中西 和雄, 1980, "すすの發生機構," 機械の研究, Vol. 32, No. 255.
- (11) 藤原, 1990, "ディーゼル微粒子生成過程の研究," 石油學會誌, Vol. 33, No. 255.
- (12) 村山 正, 1991, "ディーゼル機関における微粒子の性状ならびにその生成・消滅," 内燃機関 Vol. 30, No. 39.
- (13) 藤原 康博, 登坂 茂, 村山 正, 1989, "ディーゼル機関に於いて生成されるすす粒子の構造," 日本機械學會論文集B" Vol. 55, No. 3251.