

디젤기관에서 산소성분 첨가에 의한 배기가스 배출특성의 실험적 연구

오 영 택* · 최 승 훈** · 장 석 정***

The Experimental Study on Exhaust Emission Characteristics with Oxygen Component Addition in Diesel Engine

Y.T. Oh, S.H. Choi and S.J. Jang

Key Words: Gas Chromatography(가스 크로마토그래피), Oxygenated Fuel(함산소연료), Diesel Engine(디젤 기관), Exhaust Emissions(배기배출물), Hydrocarbon(탄화수소)

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. So, lots of researchers have studied to reduce the exhaust emissions which influenced the environment strong.

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

And, we tried to analysis the quantities of the low and high hydrocarbon among the exhaust emissions in diesel engine. It have been investigated by the quantitative analysis of the hydrocarbon C₁~C₆ using the gas chromatography. This study 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 the hydrocarbon C₁~C₆ among the exhaust emissions of the mixed fuels are exhausted lower than those of the diesel fuel at the all load and speed.

In particular, high boiling point hydrocarbons such as C₅ and C₆ were reduced remarkably in high speed and load region.

1. 서 론

루돌프 디젤(Rudolf Diesel)이 1893년 독일제국 특허국으로부터 새로운 '내연기관의 작동 사이클과 실행방법'에 관한 특허를 받은 이후, 디젤 기관은 가솔린 기관과 더불어 동력을 얻을 수 있는 대표적인 기구로서 발전을 거듭하여 왔다.

이러한 디젤기관은 높은 열효율을 낼 수 있고, 저급연료를 포함한 여러 종류의 연료를 사용할

수 있으며, 또한 고효율을 낼 수 있어 그 수요가 증가되는 추세에 있지만, 그 기관특성상 연소 후 배출되는 유해 배기가스로 인해 전 지구촌적인 대기오염의 주범으로 주목받고 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위한 방안으로는 고압분사에 의한 연소개선과 배출물 저감⁽¹⁾, 분사 시기 및 연료공급량의 제어⁽²⁾, 촉매에 의한 NOx의 저감⁽³⁾, 연소실 형상변화로 스웰과 텀블에 의한 NOx와 매연의 동시저감⁽⁴⁾ 등이 있다.

이러한 방법 이외에, 본 연구에서는 연료가 연소실 내로 분사되기 전에 함산소제를 이용하여 연료성상에 변화를 주어 배출가스의 제어를 시도하고자 하였다.

즉, 기존의 화석연료는 연료자체속에 산소성분이 전혀 존재하지 않는 탄화수소 화합물이기 때

* 정회원, 전북대학교 기계공학과, 공학연구원 공업기술연구센터
e-mail : ohyt@moak.chonbuk.ac.kr

** 정회원, 전북대학교 기계공학과 대학원

*** 학생회원, 전북대학교 학부생

문에 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 여러 가지 실험들을 살펴보면, B.L. Edgar 등⁽⁵⁾은 DME와 DMM을 이용하여 디젤기관에 적용한 경우의 자기착화 특성과 배기배출물 저감에 대한 연구를 수행하였고, 또한, Oh등은 합산소연료와 EGR 방법을 병용하여 매연과 NOx를 동시에 저감시키는 연구⁽⁶⁾에서 합산소연료가 매연과 NOx를 동시에 저감할 수 있는 가능성을 입증하였고, 또한 DMC(dimethyl carbonate)를 디젤기관에 적용한 연구⁽⁷⁾에서 합산소연료가 고부하영역에서 디젤기관의 공기이용률을 높여준 결과 매연이 현저히 저감되었음을 언급하고 있다.

또한, 대부분의 배기가스 저감에 관한 연구들을 살펴보면 통상적인 배기가스 분석기에 의한 THC(total hydrocarbon)나 PM(particulate matter)의 배출량 측정으로 배기가스를 구성하는 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 소미립자는 연료가 우선 저비등점 탄화수소로 분해되고 이중 축·중합, 탈수소반응에 따라 다환방향족 탄화수소를 지나서 미립자에 이르는 것이 주요 경로인 것으로 되어 있다.⁽⁸⁾

즉, 연료성상이 미립자의 배출량에 영향을 미치는 것은 그의 분해, 축·중합과정에 차이가 발생할 수 있다고 생각 할 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 정량·정성 분석을 모두 이용할 수 있는 가스 크로마토그래피(gas chromatography)를 이용하여 배기가스 성분 중에 함유되어 있는 C₁~C₆까지의 탄화수소의 정량적인 분석도 동시에 수행하여 저비등점 탄화수소와 고비등점 탄화

수소가 매연생성에 미치는 영향을 조사하고자 하였으며, 알려진 바와 같이 탄소수가 4이하인 경우를 저비등점 탄화수소로, 5이상인 경우를 고비등점 탄화수소로 정의하였다.⁽⁸⁾

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 단기통, 수냉식, 4행정, 직접분사식 디젤기관이며, 기관 부하와 회전속도는 엔진 동력계에 의해 임의로 조정할 수 있도록 하였다.

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
Coolent temp.	80±2°C

Table 2 Properties of test fuels.

	Diesel fuel	Diethylene glycol dimethyl ether
Molecular formula	C ₁₆ H ₃₄	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

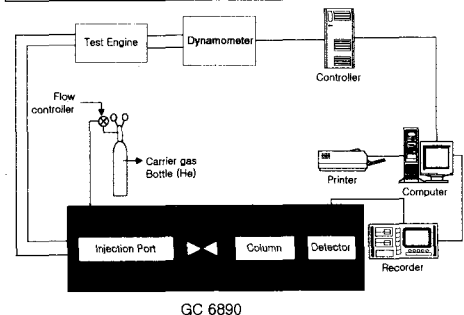


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

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

실험연료는 일반적인 상용 경유와 합산소연료인 diethylene glycol dimethyl ether(이하 DGM)을 체적비율로 환산하여 각각 5%, 10%, 15% 혼합한 연료를 기관의 각 회전속도에서 무부하, 25%, 50%, 75%, 90% 및 전부하의 경우에 기관 성능과 배기에 영향을 측정하였다.

가스 크로마토그래피를 이용한 탄화수소류의 분석 실험에서는, 매연저감 측면에서는 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, 각각의 실험조건에서 가스 크로마토그래피를 통하여 나타난 크로마토그램의 피크 면적을 비교하여 각 탄화수소가 매연농도에 미치는 영향을 조사하였다.

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

3. 실험결과 및 고찰

우선, 기관회전수가 저회전(1000rpm)과 고회전(2500rpm)의 경우 기관부하변화에 따른 매연의 배출특성을 조사하였다.

Fig. 2는 저속인 1000rpm과 고속인 2500rpm에서 각 부하에 따른 매연의 배출량 차이를 나타낸 것이다.

디젤기관의 공기이용율이 충분한 저회전영역에서는 합산소연료를 혼합한 경우 소량의 매연배출량의 차이를 보이고 있지만, 피스톤의 회전수가 증가함에 따라 충전효율이 저감되는 고속·고부하영역에서는 매연배출량에 상당한 차이를 보이고 있으며, DGM 5%를 혼합한 경우 최대 약 50%의 저감효과가 있어, 그림에서와 같이 고부하·고회전수로 진행할수록 연료속의 산소성분의 영향으로 매연배출이 현격하게 차이가 납을 알 수 있다.

Fig. 3은 기관의 부하변화에 따른 NO_x의 배출

특성을 나타낸 그림이다.

그림에서와 같이, 경유보다 합산소연료인 DGM을 첨가한 경우 전체적으로 NO_x의 배출량이 증가하는 경향을 보이고 있으며, 저부하·저회전영역에서의 차이보다 고부하와 고회전영역에서의 배출량이 차이가 상당히 증가하였고, 합산소연료의 첨가량이 증가할수록 NO_x배출량이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다.

이는 합산소연료내에 포함된 산소성분이 연소가 활발해지는 후연소기간에 화염온도를 상승시켜 NO_x의 배출량을 증가시킨 것으로 생각된다.

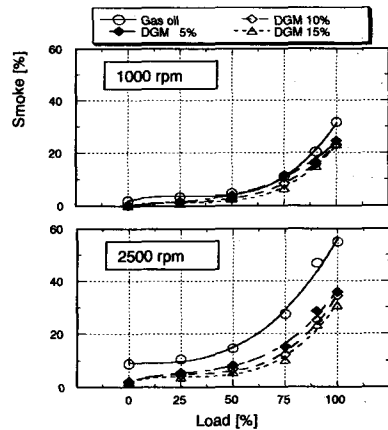


Fig. 2 Comparison of smoke density for difference of oxygenated fuel content under varying load and engine speed.

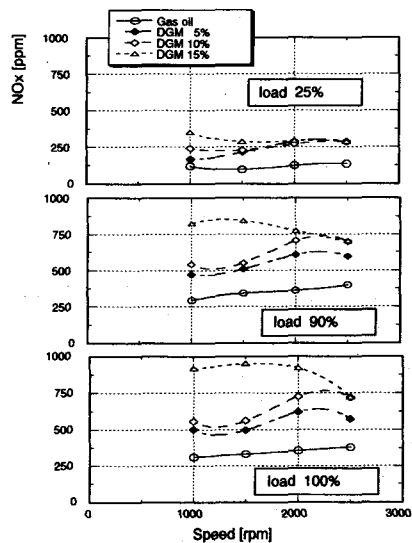


Fig. 3 Comparison of NO_x emission for difference of oxygenated fuel content under varying load and engine speed.

Fig. 4는 1000rpm과 2000rpm에서 에너지소비율을 비교한 것이다.

경유에 비하여 합산소연료인 DGM은 발열량이 약 57%에 불과하지만, 최대 혼합율이 15% 미만으로서 미세하여, 완전 연소에 의하여 연비의 차이가 적게 나타남을 나타내고 있다.

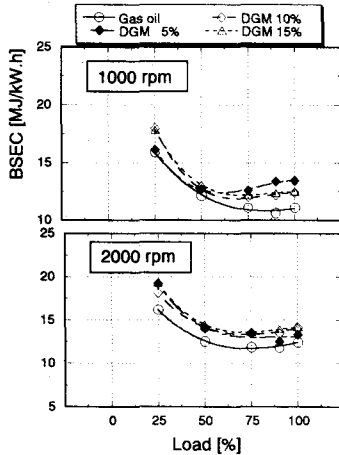


Fig. 4 Comparison of BSEC for difference of oxygenated fuel content under varying load and engine speed.

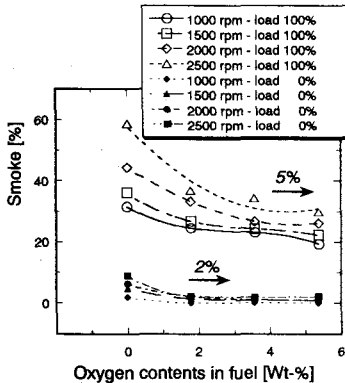


Fig. 5 Comparison of smoke density of load 0% vs. full load with various oxygen contents.

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

저부하에서는 연료속의 산소농도가 2%이상만 되어도 매연이 현저하게 저감되어 DGM을 혼합한 모든 경우에 매연배출농도가 5%미만임을 알 수 있다. 또한, 전부하 상태에서는 연료속의 산소 성분양에 비례하여 매연 배출이 현저하게 저감되며, 저회전인 경우보다 고회전인 경우가 연료속의 산소농도의 영향으로 매연저감효과가 현저함

을 알 수 있으며, 연료속의 산소농도가 5%이상이면 어느 회전영역에서나 전부하의 경우에도 매연 배출량이 거의 30% 미만에 머무르고 있다는 것을 알 수 있다.

이는 디젤기관의 연소특성상 연료내의 산소가 흡입과정시 흡입된 공기속의 산소보다는 연소를 위한 탄화수소와의 화학반응 속도가 빨라 거의 완전 연소를 이루었기 때문으로 분석되며, 또한 Fig. 4의 에너지소비율이 큰 차이가 나지 않은 것과 연관되어 생각할 수 있다.

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

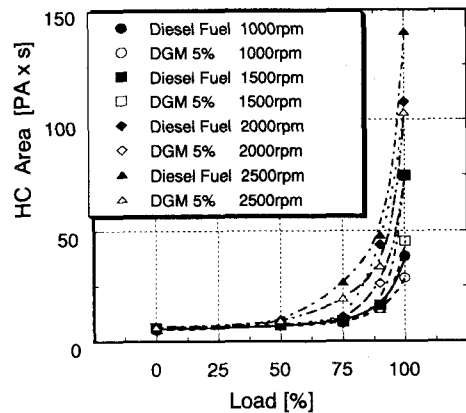


Fig. 6 Total area of hydrocarbon of two fuels on chromatogram analysis under varying engine speed and load.

Fig. 6은 1000, 1500, 2000, 2500rpm의 기관회전 속도에서 경유를 사용한 경우와 DGM을 5%혼합하여 사용한 경우에 탄화수소 분석결과로서 크로마토그램상에 나타난 각각의 피크면적을 보여 주고 있다.

그림에서 알 수 있는바와 같이, 양 연료 공회전과 고부하로 갈수록 탄화수소의 배출농도는 현저히 증가함을 알 수 있다.

이는 중부하 이하인 경우에는 경유를 연료로 사용한 경우에도 공기이용률이 충분하기 때문에 합산소연료인 DGM의 산소성분이 매연 생성에 큰 영향을 미치지 않았으나, 합산소연료를 사용

한 경우에 고부하· 회회전수로 갈수록 DGM에 포함된 산소성분에 기인하여 공기이용률이 경유의 경우와 큰 차이를 보이고, 연료 입자의 산화를 더욱 촉진시켜 매연생성에 영향을 미치는 미연탄화수소의 전체적인 양이 크게 저감되었기 때문으로 생각된다.

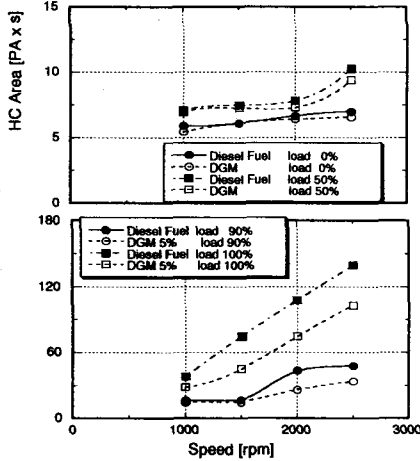


Fig. 7 Comparison of low vs. high load on total area of hydrocarbon under varying engine speed.

Fig. 7은 경유와 DGM 5%를 첨가한 경우에 저· 중부하와 고부하영역에서 회전속도 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.

무부하나 저부하인 경우에 있어서는 경유를 연료로 사용한 경우에도 기관의 특성상 디젤기관의 공기이용률이 충분하기 때문에 큰 영향을 보이지는 않았다.

특히, 고부하에서 전체적인 탄화수소의 피크 면적이 합산소연료를 사용한 경우가 훨씬 저감하는 이유는 합산소연료에 포함된 산소가 특히 연소후반부에 공기이용률을 높여 주어 매연의 산화를 촉진시키기 때문으로 생각된다.

이를 좀더 고찰해보면 디젤기관에서 배출되는 탄소상 미립자 즉 매연은 Kittleson⁽⁹⁾ 등의 연구에 의하면 연소가 시작되는 즉시 매연이 발생하는 것이 아니고 확산연소 개시 때부터 매연이 생성되기 시작하며, 실린더내의 매연의 생성속도는 운전 조건에는 별 영향이 없고, 피크 농도에도 크게 영향을 미치지 않는다고 보고하고 있어 연

소 후반부에 디젤기관의 공기이용률이 매연생성에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 전부하상태의 개별탄화수소를 분석한 경우로서, C₁(methane)을 제외한 모든 경우에 있어서 경유의 경우가 현저하게 증가하는 추세를 보이고 있다.

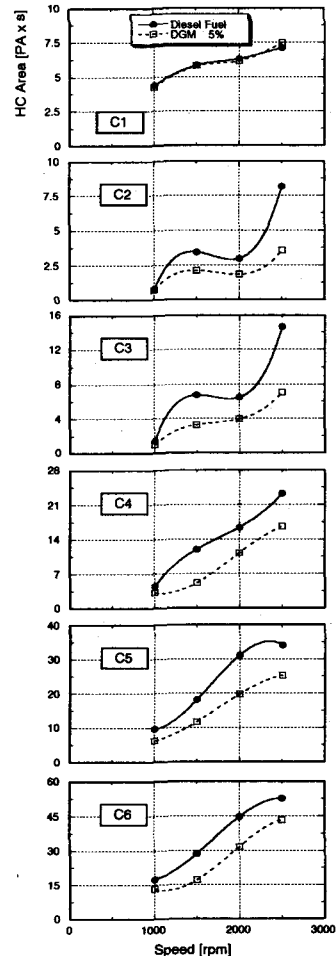


Fig. 8 Area of each hydrocarbon on chromatogram analysis under varying engine speed at full load.

Fig. 9는 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 매연배출과의 관계가 나타나지 않았지만, 고비등점 탄화수소는 위의 매연 배출성향과 비슷하게 나타난 것을 알 수 있다.

또한, 이는 Fig. 2의 전체적인 매연 배출 특성과 유사한 관계를 보이고 있어 매연배출농도에 고비등점 탄화수소의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

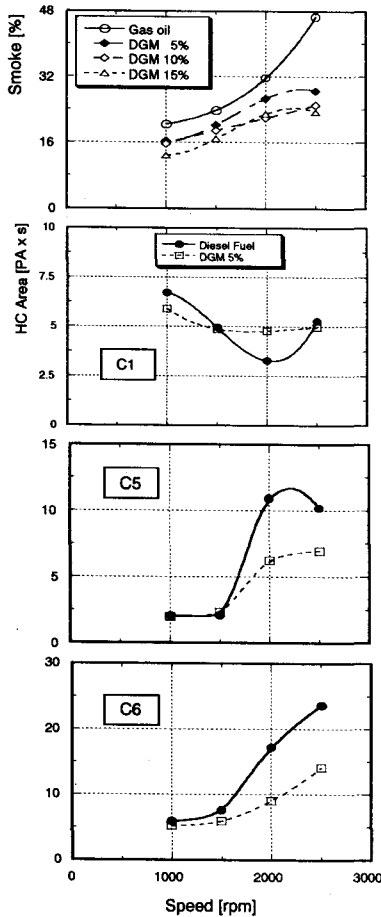


Fig. 9 Relationship of smoke and hydrocarbon for low vs. high boiling point at load 90%

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 탄화수소의 정량적 분석

이 가능하게 되었다.

(2) 매연배출특성은 고비등점 탄화수소의 생성 및 산화와 밀접한 관계가 있으며, DGM과 같은 합산소연료는 고부하와 고회전 영역에서 연료 입자의 산화를 촉진시켜 매연배출을 현저하게 억제시키는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 합산소연료를 디젤기관의 연료로 사용할 경우, 연료내에 함유된 산소량이 2%정도만 유지되어도 저부하영역에서는 매연의 배출량이 5%미만이며, 산소량이 5%정도이면 전부하의 경우 회전 영역에 큰 관계없이 매연배출량이 30% 이내로 유지되어 현저한 매연 저감 효과가 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) 小森正憲, 辻村欽司, 1990, "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 Symposium, NO. 8.
- (2) 石渡宏, 1990, "高壓噴射のタイミング, 送油率の制御", 日本自動車技術會 Symposium, NO. 8.
- (3) 岩本正和, 1990, "觸媒による含酸素化物の低減", 日本自動車技術會 Symposium, NO. 8.
- (4) 吉田清英, 1990, "觸媒によるNOx, 吐煙の同時低減", 日本自動車技術會 Symposium, NO. 8.
- (5) B. L. Edgar, R. W. Dibble and D. W. Naegeli, 1997, "Autoignition of Dimethyl Ether and Dimethoxy Methane Sprays at High Pressures", SAE Paper 971677.
- (6) Tadashi Murayama, Young-Taig Oh, et al., 1995, "Simultaneous Reductions of Smoke and NOx from a DI Diesel Engine with EGR and Dimethyl Carbonate", SAE paper 952518.
- (7) 오영택, 최승훈, 2000, "디젤엔진에서 DMC를 사용한 경우의 배기가스의 농도분석에 관한 실험적 연구", 한국자동차공학회 논문집, Vol.8, NO.2, pp.1~8.
- (8) 登坂 茂, 藤原康博, 1989, "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", 日本技術學會 論文集, 55卷 509号.
- (9) D. V. Kittleson et. al., 1988, "In-cylinder Measurement of Soot Production is a Direct - Injection Diesel Engine", SAE Paper 880344.