대형 디젤기관에서 초저유황경유, 바이오디젤 및 디젤산화촉매 적용시의 배기가스 특성

백 두 성† · 박 만 재*

(2003년 4월 28일 접수, 2003년 12월 4일 심사완료)

Emission Characteristics in The Application of ULSD, Biodiesel and DOC in Heavy Duty Diesel Engine

Doo Sung Baik and Man Jae Park

Key Words : Particulate Matter(입자상물질), Poisoning Effect(피독영향), DOC(디젤산화촉매), ULSD(Ultra Low Sulfur Diesel ; 초저유황경유)

Abstract

To develop a low emission engine, it is necessary to obtain some better quality of automotive fuels. Sulfur in fuel is transformed to sulfate-laden PM as DOC is applied. Therefore, it necessary to provide low sulfur fuels before DOC is applied. According to the specification of test fuels, flash point, distillation 90%, cetane index are improved but viscosity is decreased in the process of desulfurization. Excessively reduced sulfur may cause to decrease lubricity of fuel and engine performance in fuel injection system. Therefore, this research was emphasized how the application of Bio-diesel affects on the emission characteristics and engine performance under the circumstance of ULSD and DOC.

1. 서 론

현재 PM을 저감시키는 가장 효과적인 방법은 매연여과장치 기술이라고 인식되고 있는데, 그 원리는 PM을 필터로 포집한 후 이를 연소시키는 방법으로 효과적인 포집기술, 재생기술 및 시스템기술 등이 잘 조합되어야 한다는 선결과제가 있다.[1]

후처리 장치로서 디젤산화촉매(DOC : Diesel Oxidation Catalyst)는 매연여과장치에 비해 배출가스 중 매연 등의 입자상물질의 저감효율은 낮지만, 구조가 간단하고 내구성이 우수하며 경제성이 높고 PM성분 중 용해성유기물(SOF : Soluble Organic Fraction)의 저감 가능성이 가장 큰 기술로 차세대 배출가스 방지기술로서 실용화 가능성이 우수한 것으로 평가되고 있다.

또한 최근에는 DOC장치에 ULSD(Ultra Low Sulfur Diesel)를 적용하여 황에 의한 피독영향을 최대한 줄이는 차원에서 DOC의 내구성 및 성능향상을 위한 시험이 이루어지고 있다.[2-4]

황에 의한 피독 현상을 줄이기 위해 청정연료인 ULSD나 Bio-diesel과 같은 황 감소 연료를 적용하는 것이 바람직하며 선진국의 경우 ULSD는 정유회사로부터 2006년 1월부터 생산하여 2007년 이후에 적용할 예정이며, 이는 EUROIV 법규를 맞추기 위해 반드시 적용하여야 하는 선결과제이다.[5,6]

따라서 본 논문은 DOC 존재하에 ULSD를 적용시[7] 탈황으로 인해 악화된 연료의 점성도로 인한 분사시스템의 성능저하를 방지하기 위하여 Bio-diesel과 ULSD를 동시에 적용하여 연료조성에 따른 촉매 피독현상의 영향을 D-13모드에서 평가하였고, 기관부하에 따른 가스상물질의 정화율 등을 확인하였다. 또한 PM중 황이 DOC에 미

† 책임저자, 회원, 국민대학교 자동차공학전문대학원
E-mail : dsbaik@kookmin.ac.kr
TEL : (02)910-4817 FAX : (02)910-4718
* 회원, 국민대학교 자동차공학전문대학원

치는 영향을 알아보기 위해 Bio-diesel과 ULSD가 DOC적용에 적합한 연료인지를 정화률 특성을 통해 확인하고자 하였으며 이 두 연료가 PM저감에 효과가 있는지를 평가하고자 했다.

2. 실험장치 및 방법

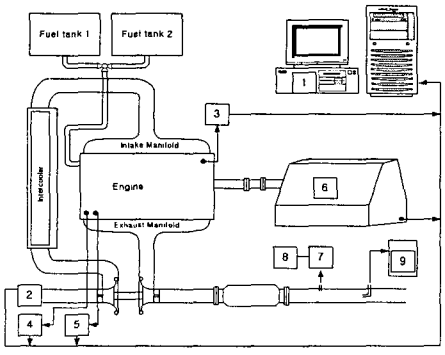
2.1 실험기관

ULSD와 Bio-diesel 적용시 연료성분에 따른 기관성능과 배출가스분석 및 파악을 위해 사용된 기관은 11000cc급 대형디젤기관을 사용하였으며 Table 1에서 그 제원을 보여주고 있다.

디젤기관에서 DOC를 장착하여 기본연료는 연료탱크1에 ULSD와 Bio-diesel을 연료탱크2로부터 3Way-valve를 통해 공급하였으며 전체적인 시험 개략도는 Fig. 1과 같다.

또한 기관동력계는 전기식 동력계(nedd-14H Type, NISHI-SIBA Co.)를 사용하였고 매연측정장치는 여지반사식 필터 타입이며, 가스상물질(CO, THC, NOx)의 농도를 측정하기위해 일본 HORIBA사 배출가스 측정기(MEXA-8120D)를, 입자상물질을 측정하기위한 장비로 AVL사의 Mini Dilution Tunnel(MDT474)을 사용하였다.

2.2 실험장치



1. Dynamometer control desk 2. Intake air consumption meter
3. Throttle actuator 4. Fuel temperature controller
5. Oil temperature controller 6. Engine dynamometer
7. Exhaust gas analyzer 8. Pen recorder
9. Mini dilution tunnel 10. Diesel oxidation catalyst

Fig. 1 Schematic diagram of emission measuring apparatus

2.3 미량유해물질 측정

디젤기관에서 배출되는 오염물질 중 규제물질 이외의 미량유해물질은 크게 입자상과 가스상으로 존재하는데, 이러한 오염물질은 미량 포함되어 시료채취와 전처리 및 분석방법에서 고도의 정밀분석기술을 요구한다.

PM에 포함된 미량유해물질로는 SOF, 황산염 등이 있으며, 가스상 미량유해물질로는 포름알데히드와 아세트알데히드 등의 알데히드류가 있다. Table 2에 미량유해물질의 측정항목별 사용된 측정장치를 간략히 나타낸다.

2.4 실험방법

국내 대형디젤기관의 배기가스 규제모드인 D-13을 선정하여 SOF, Sulfate, Carbon 등을 측정하였으며, 그 운전조건은 Table 3와 같다. 미량유해물질의 측정값은 컴퓨터에 초당 자동 입력되고 기록계를 통해 자동 기록되도록 하였다. 기관의 정화율시험은 가스상물질인 HC, CO의 시험시간에 따라 기관부하조건을 변경하여 정화율시험을 수행하였고, 매연 측정은 D-3모드조건에서 측정하여 Table 4에 나타낸다.

Table 1 Specifications of test engine

Items	Specifications
Type	6 Cylinder
Fuel injection type	DI
Displacement (cc)	11,149
Cylinder×Bore(mm)	122×156
Max.Power (PS/rpm)	250/2000
Injection timing	12 deg. BTDC

Table 2 Analysis compounds and apparatus of unregulated emissions

Compounds	Apparatus
Soluble organic fraction	Soxhlet extracter
Sulfate	Ion chromatography (Dionnex 4000i)

Table 3 Driving condition of D-13mode

Mode	Engine speed	Load rate (%)	Weight factor
1	idle	-	0.25/3
2	intermediate	10	0.08
3	〃	25	0.08
4	〃	50	0.08
5	〃	75	0.08
6	〃	100	0.25
7	idle	-	0.25/3
8	rated	100	0.1
9	〃	75	0.02
10	〃	50	0.02
11	〃	25	0.02
12	〃	10	0.02
13	idle	-	0.25/3

Table 4 Driving condition of D-3 mode

Mode	Engine speed	Load rate (%)
1	40% of rated speed	100
2	Intermediate	100
3	Rated	100

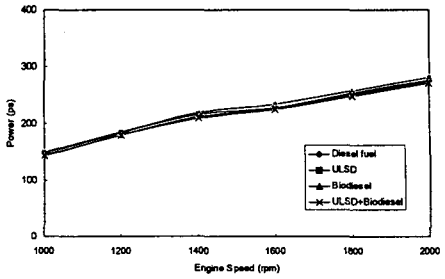


Fig. 2 Engine power test results (without DOC)

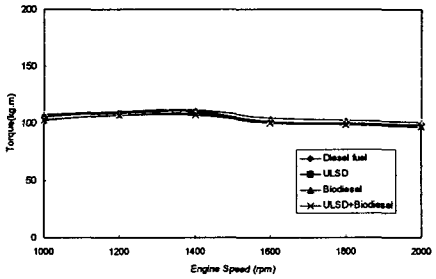


Fig. 3 Engine torque test results (without DOC)

2.5 정화율 시험

최고속도에서 부하 조건을 변화시키면서 온도에 따른 정화율시험을 통해 보다 신뢰성 있는 Data를 확보하기 위해 디젤연료의 경우는 시간간격을 600sec부터 6000sec사이를 등 간격으로 분류하였고, Bio-diesel과 ULSD의 경우는 디젤연료에 비해 정화시간에 빨리 도달되므로 시간간격을 좁혀 250sec부터 2500sec사이를 등 간격으로 하여 기록계에 자동기록 되도록 하였으며 배기가스 온도는 120℃에서 시작하여 지속적으로 온도를 상승시켜 배출가스 중 HC와 CO의 정화율 상태를 확인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기관출력 및 토크

Fig. 2과 Fig. 3은 DOC를 장착하지 않았을 경우에 기관출력과 토크의 결과를 나타낸 그림이다.

그림에서와 같이 기관의 출력과 토크는 경유에 비해 ULSD와 바이오디젤에서 다소 감소되는 결과를 보여주고 있다. DOC를 장착하지 않았을 경우 경유보다 ULSD는 저속에서 1.3%, 고속에서 2% 정도의 출력감소을 나타났고 기관출력감소요인은 일반 상용경유보다 ULSD와 바이오디젤의 세탄가가 높아 연소조건은 향상되지만 연료의 점성에 의한 영향, 분사시 관통력의 부족으로 분무과정에서 점성의 저하의 영향에 의한 결과로 충분한 양의 연료가 실린더내로 분사되지 못하는 원인으로 판단된다. 바이오디젤의 경우는 저속에서 약 3.5%, 고속에서 3%정도의 출력감소를 나타내었으며, 기관출력저감요인은 점성이나 세탄가는 높지만 열량(calorific value)이 경유보다 작아서 감소하는 현상이 나타났다.

바이오디젤과 ULSD 동시 적용시 출력감소율이 4.5%이며, 이는 ULSD사용에 따른 연료내 점도저하에 따른 기관의 출력 및 토크 감소를 바이오디젤이 윤활성을 보완함으로서 감소분을 상쇄시키는 결과를 초래했다. 이는 바이오디젤을 적용하는 경우의 출력감소와 동일한 수준으로 ULSD와 복합 적용시 기관성능 변화의 폭이 적음을 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5은 DOC를 장착하였을 경우의 기관출력 및 토크의 결과를 나타낸 그림이다.

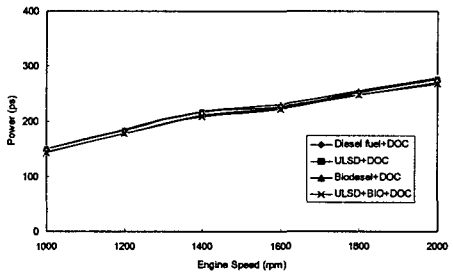


Fig. 4 Engine power test results (with DOC)

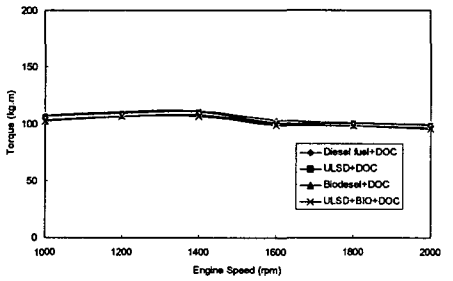


Fig. 5 Engine torque test results (with DOC)

DOC를 장착하였을 경우 경유보다 ULSD는 약 2.5% 정도의 출력이 감소되고 바이오디젤의 경우는 약 4%의 출력감소를 확인하였다. 바이오디젤과 ULSD를 함께 적용하면 5%의 출력감소를 보여 두 연료의 절대량의 감소보다 작은 값을 나타내는 것으로 보아 바이오디젤의 윤활성 향상의 결과로 판단된다.

3.2 연료소비율

Fig. 6과 Fig. 7은 DOC장착 유무에 따른 연료소비율의 변화를 보여주고 있다. 기관성능과 마찬가지로 미소한 변화폭을 보여주고 있으며 DOC를 장착하지 않았을 때 경유연료 대비 ULSD의 연료소비율은 약 1%정도 저감되었고 바이오디젤은 약 2~3% 정도 증가됨을 알 수 있다. 또한 ULSD와 바이오디젤을 함께 적용하면 1~2% 정도 증가되어 비례적인 향상을 확인할 수 있다. ULSD 적용시 기본사양대비 연료소비율이 향상되는 이유는 연료의관통력은 작지만 연료의 무화가 촉진되어 기관효율이 향상되는 것으로 판단된다.

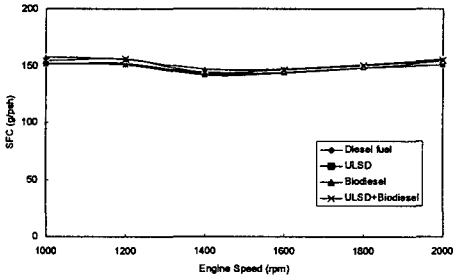


Fig. 6 BSFC test results (without DOC)

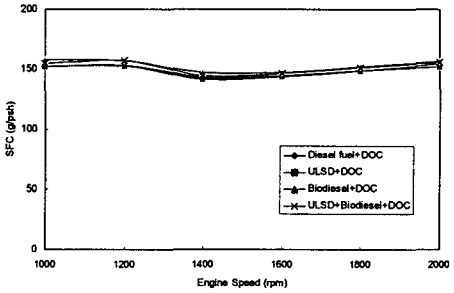


Fig. 7 BSFC test results (with DOC)

3.3 연료조성에 따른 미량유해물질

디젤 기관에서 PM의 일반적인 조성은 운전조건에 따라 차이가 있으나 일반적으로 탄소(Soot)가 50~60%를 차지하며, SOF가 약 20% 그리고 나머지는 황산염, 중금속 및 결합수 등으로 구성된다. Fig. 8는 경유와 Bio-diesel을 사용하여 DOC 장착 전·후의 SOF와 황산염의 저감특성을 나타낸 것이다. 시험조건은 D-13모드에 의한 측정결과로서 경유에 DOC를 장착하면 PM이 더 증가하는 현상을 볼 수 있는데 이는 배출가스 온도상승에 따른 Sulfate가 0.05g/kWh 증가함에 의해 전체 PM배출량도 함께 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 Bio-diesel 적용시 SOF는 32% 증가하였지만 탄소가 57% 감소함에 따라 전체 PM은 경유대비 18% 감소한 경향을 나타내었다. 특히, DOC를 장착하면 SOF의 정화효과가 뚜렷하여 경유대비 26% 감소율을 나타냈다.

또한 ULSD 적용시 SOF는 경유대비 35% 정도 증가하였지만 탄소가 50%정도 감소하여 전체 PM은 경유대비15% 정도 감소하는 경향을 나타냈고, DOC를 장착하면 SOF의 정화효과에 의해 22% 정도가 감소하였다.

3.4 기관 부하에 따른 정화율 특성

디젤산화촉매장치의 정화율은 귀금속 촉매의 양, 담체의 조성 및 셀 밀도 등이 정화율에 커다란 영향을 미친다. 그러나 정화율에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 배기가스 온도와 속도이다. 최고속도와 고부하 조건을 기준으로 하여 온도에 따른 정화율시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 기관회전수를 1200rpm으로 고정시킨 상태에서 부하를 조절하여 배기가스온도를 증가시켜 CO와 HC의 정화율시험을 실시한 결과 다음과 같은 경향을 알 수 있었다.

Fig. 9는 일반경유에 DOC를 장착하여 정화율 실험을 실시한 것이고 Fig. 5는 ULSD에 DOC를 장착하여 정화율실험을 실시한 것이다. Fig. 4는 디젤연료를 사용한 CO의 정화율실험으로 CO는 온도가 증가할수록 서서히 감소하다가 기록시간 3000sec인 배기온도 200℃부근에서 급격히 저감되며 350℃에 완전정화됨을 알 수 있었다.

또한, HC는 CO보다 부하를 증가시켜 기록시간 3800sec에서 배기온도는 220℃를 나타내며 이때 HC가 급격히 감소함을 알 수 있다. Fig. 10는 ULSD를 사용한 정화율 시험을 한 것으로 황함량 저감에 따라 경유를 적용할 때 보다 짧은 기록시간인 1580sec, 배기가스온도 180℃에서 CO는 급격히 저감되었고 230℃이상에서 완전 정화됨을 알 수 있었다. 두 그림에서 CO와 HC가 정화되는 시점을 보면 ULSD가 디젤연료보다 빨리 정화되어 황에 의한 촉매 피독영향이 적음을 알 수 있다.

Fig. 11은 Bio-diesel을 적용하여 정화율 시험을 하였으며 부하조건은 ULSD의 정화율 시험과 거의 일치하는 경향을 보이고 있다.

그러나 부하조건에 따라 CO와 HC가 ULSD보다 짧은 시간인 620sec에서 저감되기 시작하여 1500sec에서 급격히 저감되어 220℃이상에서 완전정화됨을 알 수 있었다.

따라서 Bio-diesel과 ULSD는 디젤연료에 비하여 황함량이 적은 연료이기 때문에 보다 빠른 시간에 낮은 온도조건에서 정화율이 높다는 것을 알 수 있다.

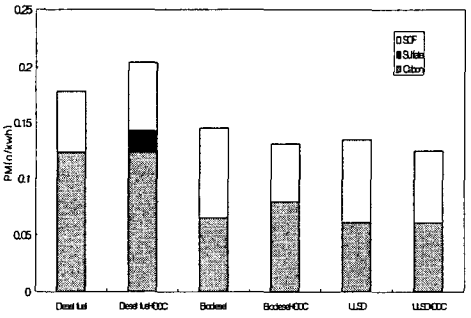


Fig. 8 SOF, Sulfate, Carbon for D-13 mode

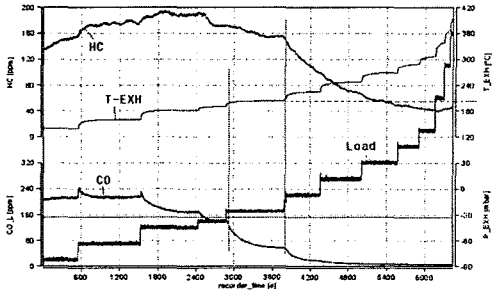


Fig. 9 The result of DOC test (diesel fuel)

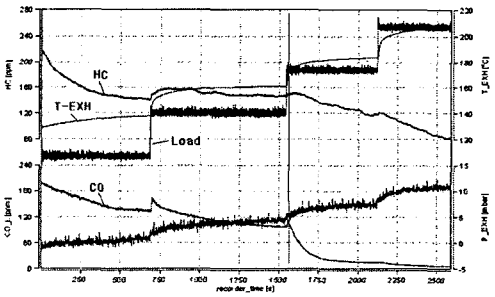


Fig. 10 The result of DOC test (ULSD)

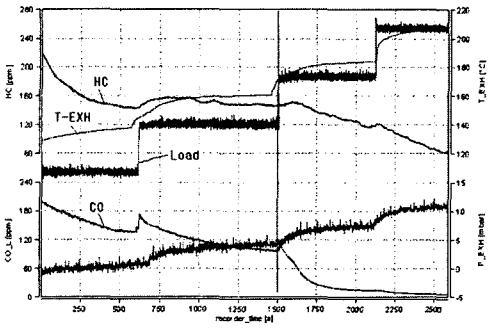


Fig. 11 The result of DOC test (Bio diesel)

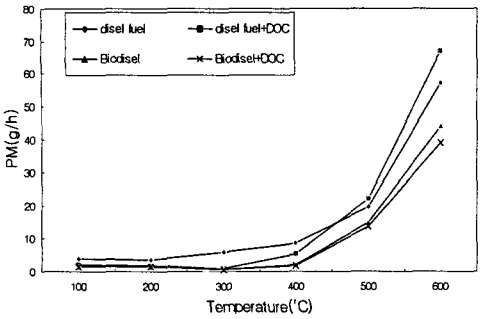


Fig. 12 Diesel particulate matter with and without diesel oxidation catalyst according to exhaust temperature variations

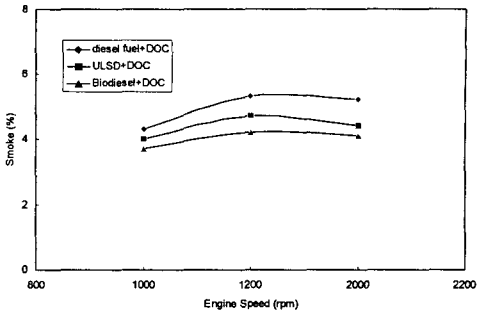


Fig. 13 Smoke reduction for D-13 mode (with DOC)

3.5 배기온도에 따른 PM정화성능

Fig. 12은 배기가스온도변화에 따른 PM정화성능을 나타낸 것이다. 배기가스 온도가 300℃ 되는 부근에서 정화성능이 가장 양호하여 입자상물질의 저감효율이 가장 높지만, 500℃에서 600℃ 부근에서 정화성능이 급격히 떨어져 입자상물질이 급격히 증가함을 알 수 있다. 특히 일반연료에 DOC 장착전·후의 정화율 특성을 보면 500℃ 정도부터 Sulfate와 SOF의 영향으로 DOC장착후가 DOC 장착전에 비해 PM의 증가량이 높은 것을 알 수 있다.

그러나 Bio-diesel은 황함량 감소에 의해 500℃ 이상에서 DOC 장착후가 DOC 장착전에 비해 PM이 약 7% 정도 감소하는 것을 알 수 있다.

3.6 매 연

Fig. 13은 매연규제시험방법인 D-3 모드에서 디젤기관의 매연농도를 측정한 결과이다. 그림에 나타난 것과 같이 매연농도는 절대값 보다 매우 낮은 수치로서 측정오차범위이내이고 매연농도 5%이하는 육안으로 보이지 않는 상태로서 여지반사식 매연측정법으로 이를 분별한다는 것은 매우 어렵다. 디젤산화촉매장치를 장착하였을 때 경유와 ULSD를 비교하면 약 15%정도의 매연 저감율을 보이고 있다. 또한 Bio-diesel의 경우는 30% 정도 매연감소를 보이고 있다. 또한, ULSD와 Bio-diesel를 혼합하여 사용한 경우 이러한 저감현상은 황 함량 감소에 따라 뚜렷한 PM 저감율을 나타냈으며 특히, Bio-diesel은 PM중 SOF의 감소에 의해 보다 큰 감소효과를 나타냄을 알 수 있다.

4. 결 론

(1) D-13모드 시험에서 경유에 DOC를 장착하면 전체 PM은 증가하는 경향이 나타났고 Bio-diesel적용시 전체 PM은 경유 대비 18% 감소하였고 DOC를 장착하면 SOF의 정화효과에 의해 경유대비 26%가 감소한 경향을 나타내고 있다.

(2) 기관부하에 따른 CO와 HC의 정화율 시험은 일반경유는 배기온도 200℃부근에서 급격히 저감되며 350℃에서 완전 정화됨을 알 수 있었고, ULSD와 Bio-diesel은 배기온도 180℃부근에서 급격히 저감되며 230℃정도에서 완전 정화됨을 알 수 있었다.

(3)배기가스온도변화에 따른 PM정화성능은 일반경유인 경우에 300℃부근에서 정화성능이 우수하였고 500~600℃에서 정화성능이 떨어짐을 알 수 있었고 Bio-diesel의 경우는 DOC 장착전과 장착후를 비교하면 DOC장착후가 PM이 약 7%정도 감소함을 알 수 있다.

(4) 매연 규제 시험방법인 D-3모드에서 기관의 매연농도를 측정한 결과 DOC를 장착하였을 때 경유와 ULSD를 비교하면 약 15%정도의 매연 저감율을 보이고 있다. 또한 Bio-diesel의 경우는 30% 정도 매연저감을 보이고 있다.

후 기

이 논문은 2003년도 두뇌한국 21사업에 의하여

지원되었음.

참고문헌

(1) Gieshoff, J., Pfeifer, M., Schafer-sindlinger, A., Hackbarth, U., Teysse, O., Colignon, C., Rigaudeau, C., Salvat, O., Krieg, H. and Wenclawiak, B.W., 2001, "Regenration of Catalytic Diesel Particulate Filters," SAE paper 2001-01-0907.

(2) Khair, Magdi, McKinnon, Dale L., 1999, "Performance Evaluation of Emission Control Technologies for Diesel Heavy-Duty Engines," SAE 1999-01-3564.

(3) Vincent, M. Richards, W., Richards, P. J., 2000, "The Long Distance Road Trial of Combined Diesel Particulate Filter and Additive," SAE paper 2000-01-2849.

(4) Lee, C., 2002, "Status and Trends of Diesel Particulate Matters Reduction Technology," *J. of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 24, No. 4, pp. 59~65.

(5) California Energy Commission, 2001, "Emission Reduction Technology Assessment for Diesel Backup Generators in California," P500-0-028.

(6) Christopher A. Sharp, Steve A. Howell and Joe Jobe, 2000, "The Effect of Biodiesel Fuels on Transient Emissions from Modern Diesel Engines, Part 1 Regulated Emissions and Performance," SAE 2000-01-1967.

(7) Sang K. Oh, Doo S. Baik, Young C. Han, 2002, "Experimental Study on Performance and Exhaust Gas Characteristics by Low Sulfur Fuels in Diesel Engine," *JSAE Annual Congress Proceedings* (20025334).