

대두유 바이오 디젤연료가 압축 착화 연소에서 배기가스에 미치는 영향

한 만 배^{*†}

* 계명대학교 기계자동차공학과

Effects of Soybean Biodiesel Fuel on Exhaust Emissions in Compression Ignition Combustion

Manbae Han^{*†}

* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.,

(Received July 5, 2010 ; Revised August 18, 2010 ; Accepted August 18, 2010)

Key Words: Low Temperature Combustion(저온 연소), Ultra Low Sulfur Diesel Fuel(초저유황디젤연료), Soybean Biodiesel Fuel(대두유 바이오 디젤연료)

초록: 1.7L 커먼레일 직접분사 디젤엔진에 대하여 바이오 디젤 연료가 conventional 연소(PM-NO_x 트레이드오프 존재)와 저온 연소(low temperature combustion, LTC)에서 배기가스 배출에 미치는 영향을 분석하였다. LTC 연소는 conventional 연소 대비 다량의 EGR 과 연료분사 조건 최적화를 통하여 이루어졌다. 실험에 사용한 두 가지 연료는 초저유황 디젤연료(ultra low sulfur diesel fuel, ULSD), ULSD 에 대두유를 20%(vol. base)혼합한 바이오 디젤 연료(B20)이다. 사용된 연료에 관계없이 LTC 연소를 통하여 conventional 연소 대비 PM 및 NO_x 의 동시 저감이 가능하였다. 동일한 엔진작동 조건에 대하여 conventional 연소의 경우 B20 는 ULSD 보다 PM 은 적게 배출되나, NO_x 는 많이 배출되었다. LTC 연소의 경우 B20 는 ULSD 보다 PM 및 NO_x 생성이 많았다.

Abstract: This study aims to investigate the effects of soybean biodiesel fuel on exhaust emissions with regards to two combustion modes: conventional combustion(existence of PM-NO_x trade-off behavior) and low temperature combustion(LTC) in a 1.7 L common rail direct injection diesel engine. As compared to conventional combustion, LTC was achieved by adopting a heavier exhaust gas recirculation and strategic injection parameter optimization. Two sets of fuels, i.e. ultra low sulfur diesel(ULSD) and 20% volumetric blends of soybean biodiesel with ULSD(B20) were used. Regardless of the fuel type, in LTC the simultaneous reduction of PM and NO_x was observed and both levels were significantly lower than in case of conventional combustion. Under the given engine operating condition in the case of conventional combustion, B20 produced less PM and more NO_x than ULSD. In the case of LTC combustion, B20 produced more PM and NO_x than ULSD.

1. 서론

석유 에너지에 대한 의존성을 낮추고 지구 온난화의 주 원인으로 알려진 이산화탄소 감축을 위하여 세계적으로 많은 연구가 진행 중이다. 특히, 식물성 기름이나 음식물 쓰레기에서 추출한 동물성 지방을 에스터 교환반응(transesterification)을 통하여 지방산 메틸 에스터(fatty acid methyl ester)라는 바이오 연료를 운송 수단용으로 사용할 수 있는지

에 관한 연구들이 진행되고 있다.^(1~9)

일반적으로 바이오 연료를 사용하였을 때 압축 착화(compression ignition) 연소의 경우 일반 디젤 연료와 비교하여 입자상 물질(particulate matter, PM) 배출은 저감되고, 질소산화물(nitrogen oxides, NO_x)은 증가하는 것으로 보고되고 있다.^(3~9) PM 저감은 바이오 연료에 포함된 함산소(fuel-borne oxygen)에 의하여 연료와 공기 혼합기의 국소 당량비(local equivalence ratio)의 과농 정도가 낮아지기 때문으로 판단된다. NO_x 증가 원인으로는 i) 기계식 연료 분사시스템의 경우 바이오 연료의 체적탄성계수(bulk modulus)가 커서 연료분사시기

† Corresponding Author, mbhan2002@kmu.ac.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

(start of injection, SOI)가 진각(advance)되어 연소 온도가 증가, ii) 연소 과정중의 매연 복사(soot radiation)에 의하여 실린더 벽면으로의 열전달 감소로 인한 연소 온도 증가, iii) 이중결합에스터(double bonded ester) 성분이 많아서 prompt NO 생성의 증가 등이 보고 되고 있다.⁽³⁻⁹⁾

본 연구에서는 대두유(soybean)를 초저유황 디젤연료(ultra low sulfur diesel fuel, ULSD)와 혼합한 바이오디젤 연료를 이용하여 연소 모드(combustion mode)에 따른 배기가스에 미치는 영향을 분석하였다. 연소 모드는 엔진 제작사의 기본 연소 방식(이하 conventional 연소)과 다량의 배기가스 재순환(exhaust gas recirculation, EGR)과 고압의 연료분사 및 분사시기 제어를 이용하여 연소 온도를 낮추고 공기와 연료의 예혼합(premixedness) 정도를 증가시켜 NO_x 와 PM 을 동시에 저감하는 저온연소(low temperature combustion, 이하 LTC 연소)이다.

2. 실험 방법

본 실험을 위하여 독일 Mercedes Benz 사의 1.7L DOHC 커먼 레일 직접분사(common rail direct injection) 엔진을 이용하였다. Table 1 은 상세한 엔진 설명이다.

사용한 연료는 ULSD 와 ULSD 에 대두유 20%(체적 %)를 혼합하여 만든 연료(이하 B20) 이다. 두 연료를 비교하면 대두유는 ULSD 연료보다 세탄가와 비중 및 점성, 증발온도가 높으며, 저위 발열량(lower heating value)은 약 7%정도 낮다. 특히 100% 대두유는 약 11% 정도의 함산소(fuel borne oxygen)를 포함한다. 이러한 연료의 특성들은 연소 및 배출가스에 다양한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 보다 상세한 ULSD 와 100% 대두유에 대한 물성치를 Table 2 에 명시하였다.

Conventional 연소와 LTC 연소에 대하여 1500

Table 1 Engine specifications

Bore (mm)	80
Stroke (mm)	84
Displacement (liters)	1.7
Number of Cylinders	4
Compression Ratio	19.5
Valves per Cylinder	4
Piston Bowl	Re-entrant
Fuel Injection System	Common rail
Injector: Dia. (mm) x no. of holes	0.169 x 6

rpm 2.6bar BMEP 에서 ULSD 연료와 B20 연료의 배기가스에 미치는 영향을 분석 및 비교하였다. Table 3 에서와 같이 conventional 연소는 엔진 제작사의 기본 엔진 데이터를 사용한 2 회 연료분사 즉 파이럿 분사(pilot injection)와 주 연료분사(main injection)로 이루어졌으며, LTC 연소는 주 연료분사 1 회(single injection)로 이루어진다.

흡기 산소량은 다량의 EGR 이 공급되는 LTC 연소가 conventional 연소 보다 약 4% 정도 낮다. 연료레일압력 또한 LTC 연소가 높으며 흡기온도 또한 다량의 EGR 의 영향으로 높다. 상세한 운전 변수에 대한 것은 Table 3 에 명시하였다.

PM 측정은 광학식인 AVL 사의 415S 를 사용하여 연료 및 연소 모드에 따른 PM 경향을 해석하였다. 추가적으로 TEOM(Tapered Element Oscillating Microbalance)법을 사용하여 (R&P 사의 1105A) 광학식 법으로 얻은 PM 과의 결과를 비교하였다. 일반적으로 광학식으로 PM 을 측정하면 주로 매연(black soot)이 검출되나, 실제 PM 의 구성 성분은

Table 2 Fuel specifications.

Properties		ULSD	Soybean B100
Oxygen (% mass)		0	11.1
Cetane Number (-)		43.0	59.0
Specific Gravity (-)		0.845	0.885
Viscosity (cSt)		2.3	4.2
Lower heating value (MJ/kg)		42.9	40.3
Distillation (°C)	10%	204	310
	50%	251	345
	90%	311	349
Sulfur [ppm]		8.3	0.8

Table 3 Engine operating parameters.

Combustion mode	Conventional	LTC
Speed (rpm)	1,500	1,500
BMEP (bar)	2.6	2.6
SOI (°CA ATDC) (pilot/main)	-18.2/-2.0	NA/-8.0
Intake oxygen (%)	20 ± 0.2	16.0 ± 0.3
Rail pressure (bar)	320	580
EGR rate (%)	13 ~16	39~ 43
Intake manifold pressure (kPa)	103	99
T _{intake} (°C)	36~ 42	79~ 84

매연 이외에 SOF(soluble organic fraction)와 같은 탄화수소 성분이 포함되기 때문에 TEOM 법을 이용하여 SOF 성분을 포함한 전체 PM 량에 대한 정보를 얻을 수 있으므로 PM 측정 방법에 따른 PM 결과를 비교하였다. TEOM 필터는 Pallflex 사의 TX40 을 사용하였다. 내부 전달라인(Transfer line)은 50°C 를 유지하였고, 장비 내부의 온도는 47°C 를 유지하였으며, 공기와 배기가스의 희석비(dilution ratio)는 약 8:1, 유량은 3 l/min 으로 약 5 분 동안 측정하여 PM 을 계산하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Conventional 연소에 따른 배기 가스 특성

1500 rpm, 2.6bar BMEP 조건에서 ULSD 와 B20 연료 각각에 대하여 conventional 연소와 LTC 연소에 대하여 열방출 특성을 비교하였다(Fig. 1, Fig. 2). 특히, Fig. 1 과 Fig. 2 의 상단에 있는 신호는 인젝터 코일에서 채집한 인젝터 전류로 실제 SOI 위상을 보이기 위한 것이다. Fig. 1 의 1 차 열방출 크기로부터 conventional 연소의 경우 B20 연료의 파이럿 분사(pilot injection) 에 의한 1 차 열방출 크기는 상대적으로 ULSD 연료와 비교하여 낮으나, 주 연료분사(main injection)로 인하여 발생하는 2 차 열방출량은 더 크다(Fig. 1). Fig. 1 에서와 같이 두 연료는 거의 동일한 연소 위상(combustion phasing)을 갖는다. 그러나 주 연료분사에 의한 2 차 열방출량의 크기가 B20 가 ULSD 대비 크기 때문에 B20 의 연소 온도가 ULSD 보다 높을 것으로 판단된다. 그러므로 B20 는 높은 연소온도와 더불어 합산소의 존재로 PM 산화 정도가 커서 PM 배출이 ULSD 연료대비 더 적은 것으로 판단된다(Fig. 3). 또한 B20 의 NOx 는 연소온도 증가에 의하여 ULSD 대비 더 많이 배출된 것으로 판단되며(Fig. 4) 연료의 구조에 의한 NOx 발생 가능성은 추가적인 실험이 요구된다. B20 의 ULSD 대비 높은 연소 온도가 예상되며, 또한 합산소의 존재로 THC 및 CO 의 감소가 예상되었으나, 본 실험의 운전 조건에서는 THC 와 CO 는 시험 오차 범위 내에서 뚜렷한 차이를 보이지 않았다(Fig. 5, Fig. 6).

3.2 LTC 연소에 따른 배기가스 특성

약 40%의 다량의 EGR 과 고압의 연료분사압력, 분사시기의 최적화를 통하여 ULSD 및 B20 연료에 대하여 PM 및 NOx 가 동시에 저감되는 LTC 연소 영역 존재를 확인하였다. 이러한 LTC 연소의 경우 열방출 특성을 살펴보면 동일한 연료 분사시

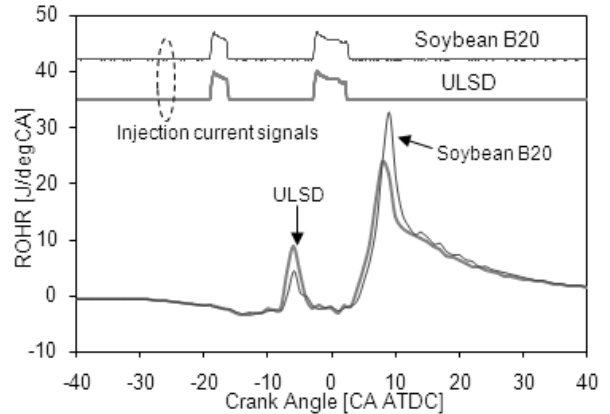


Fig. 1 Heat release rate analysis at 1500 rpm 2.6 bar BMEP condition with conventional combustion

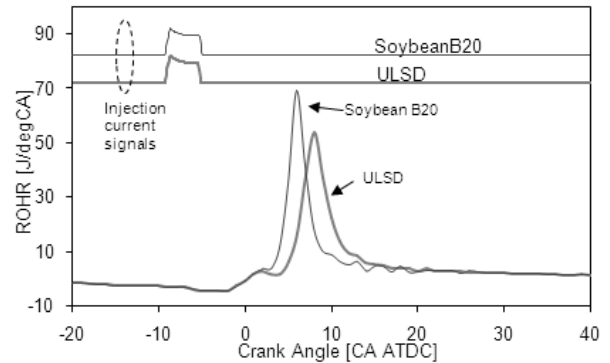


Fig. 2 Heat release rate analysis at 1500 rpm 2.6 bar BMEP condition with LTC combustion

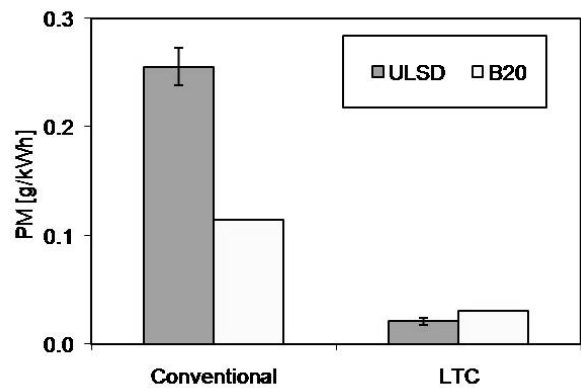


Fig. 3 PM emissions for two combustion modes, conventional combustion and LTC combustion at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

기에 대하여 B20 연료의 열방출이 ULSD 연료보다 더 크고, 발생 위치는 약 3°CA 정도 진각되었다(Fig. 2). B20 연료에 의한 연소 위상 진각의 원인은 흡입 행정에서의 산소의 양과 온도는 서로 동등한 수준이나(Table 3), 대두유 연료의 높은 세탄

가와 합산소량에 의한 것으로 판단된다. 두 가지 연료 모두 PM 과 NOx 은 conventional 연소 대비 저감효과가 70% 이상을 보이나(Fig. 3, Fig. 4), THC 및 CO 는 30%이상 증가하였다(Fig. 5, Fig. 6).

B20 연료의 경우 ULSD 와 동일한 SOI 에 대하여 연소 위상이 앞서므로 착화지연이 짧아서 연료와 공기의 혼합 시간이 ULSD 연료와 비교하여 짧아 예혼합 정도가 상대적으로 불리하였기 때문에 PM 생성이 증가한 것으로 판단된다. SOI 시기를 지각하여(retard) 질량연소율 50% 위치등과 같은 연소 위상을 ULSD 와 동일하게 유지한다면 PM 저감 효과를 기대할 수 있으리라 예상된다. 이와 더불어 LTC 연소의 특성으로 PM 발생이 conventional 연소 대비 70%이상 적으므로 PM 증가에 대한 정량적인 분석은 보다 많은 실험과 이를 바탕으로 통계적 분석이 요구된다.

NOx 의 증가는 B20 의 합산소의 존재와 더불어 Fig. 2 에서와 같이 높은 세탄가에 의하여 연소 위상이 진각되고, 최대 열방출량이 커서 연소 온도가 높아졌기 때문으로 판단된다. B20 연료에 포함되어있는 이중 결합 에스터 성분에 의한 NOx 증가 영향에 관한 논의는 본 실험의 결과로부터는 해석하기가 어려우며 추가적인 실험이 요구된다.

Conventional 연소에서의 결과와는 달리 THC 및 CO 는 B20 가 ULSD 대비 더 감소한 결과를 보였다. 이는 B20 연료 특성으로부터 연소 위상이 동일한 SOI 에 대하여 약 3°Ca 정도 진각되어 연소 온도가 높고, 또한 연료에 포함된 합산소의 영향으로 THC 및 CO 배출이 감소한 것으로 판단된다.

3.3 연료소모율 비교

연료소모율(brake specific fuel consumption, BSFC)

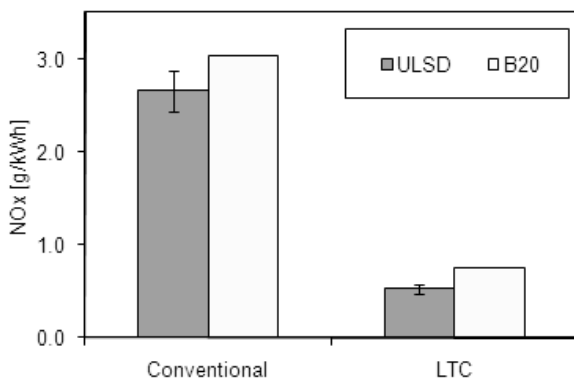


Fig. 4 NOx emissions for two combustion modes, conventional combustion and LTC combustion at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

은 B20 의 경우 연소 모드에 관계없이 ULSD 연료보다 증가하였는데 이는 저위발열량이 상대적으로 낮기 때문으로 판단된다(Fig. 7). 동일한 연료에 대하여 conventional 연소와 비교하여 LTC 연소는 다소 연료소모율이 증가하는데 이는 연료분사 방법의 차이, 연료분사 시기를 실린더 압력상승률이 10 bar/°CA 이하가 되도록 설정, 저온의 연소에 의한 것으로 파악된다.

3.4 분석 방법에 따른 PM 배출 특성 비교

Fig. 8 은 TEOM 방법을 이용하여 측정시간에 따른 필터에 누적된 PM 질량을 보여준다. 시간에 따른 PM 의 누적된 질량의 기울기는 선형적인 특성을 보여준다. 1 차 선형 회귀(regression)법을 이용하여 기울기를 얻었으며, 이로부터 PM 의 질량유량을 계산하였고, 희석비와 엔진 출력으로부터 단위 출력당 PM 량을 계산하였다.

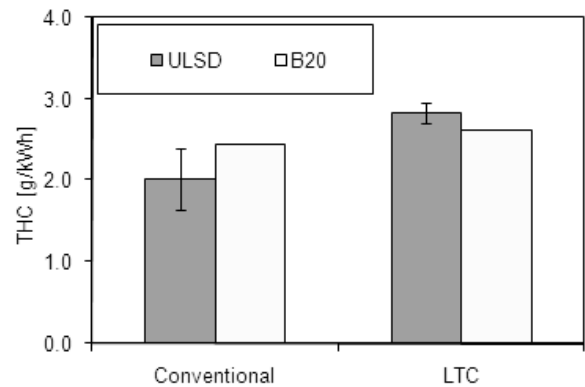


Fig. 5 THC emissions for two combustion modes, conventional combustion and LTC combustion at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

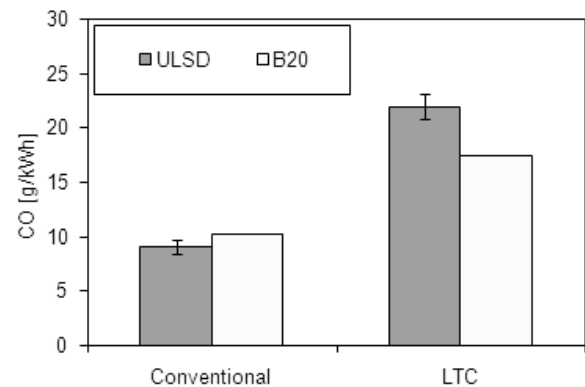


Fig. 6 CO emissions for two combustion modes, conventional combustion and LTC combustion at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

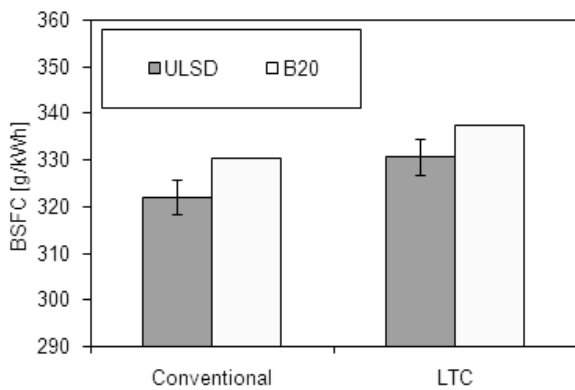


Fig. 7 BSFC for two combustion modes, conventional combustion and LTC combustion at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

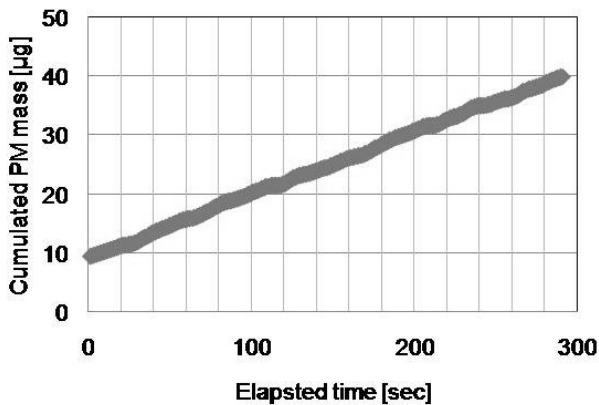


Fig. 8 Typical TEOM result: cumulated PM mass versus elapsed time

Conventional 연소와 LTC 연소 각각에 대하여 ULSD 및 B20 연료에 대한 TEOM 분석을 이용한 PM 배출량을 계산하였으며, 각각 Fig. 9 와 Fig. 10 에 그 결과를 나타내었다. 연료와 연소 모드에 관계없이 TEOM 법으로 PM 을 측정할 경우 광학식 방법에 의한 것 보다 높은 PM 값이 측정되었다. 이는 광학식 법으로는 주로 매연(black soot)을 검출하나, TEOM 방법은 질량을 재는 방법이므로 매연 이외에 PM 을 구성하는 SOF 성분이 측정 결과에 반영되었기 때문으로 판단된다. TEOM 방법으로 PM 을 측정된 결과 역시 광학식 방법과 같은 경향의 PM 배출 특성을 얻을 수 있었다.

Conventional 연소의 경우 광학식으로 측정된 PM 량은 연료에 관계없이 TEOM 방법으로 측정된 PM 량의 약 70% 수준이다. LTC 연소의 경우 이보다 적은 약 40% 수준을 보인다. 이 결과로부터 LTC 연소의 저온 연소 특성상 SOF 배출량이 많음을 유추할 수 있다.

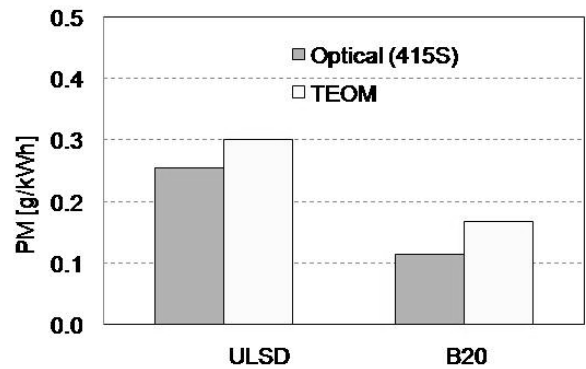


Fig. 9 Comparison of PM measurement of optical method to TEOM method for conventional diesel combustion at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

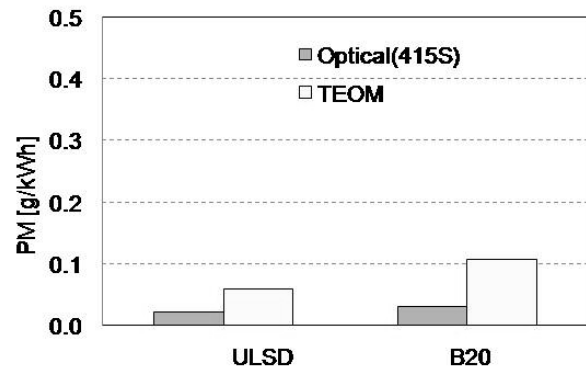


Fig. 10 Comparison of PM measurement of optical method to TEOM method for LTC combustion at 1500 rpm, 2.6 bar BMEP

4. 결 론

본 논문을 통하여 1.7L 커먼 레일 직접 연료분사 디젤엔진을 이용하여 ULSD 연료 및 ULSD 와 대두유를 20%(vol. base) 혼합한 B20 연료가 conventional 연소와 LTC 연소 에 대하여 배기가스에 미치는 영향을 검토하였다. B20 연료로도 PM 및 NOx 를 동시에 저감할 수 있는 LTC 연소가 가능함을 확인하였다. Conventional 연소의 경우 B20 연료는 ULSD 연료와 비교하여 PM 은 감소하고 NOx 는 증가하는 경향을 확인하였다. 그러나 LTC 연소의 경우 conventional 연소의 경향과는 달리 B20 가 PM 및 NOx 모두 증가하였다. PM 배출량이 작고 증가 정도 또한 미미하여 보다 많은 통계적 분석과 실험이 요구된다. 또한 PM 측정 방법 중 TEOM 방법이 광학식 방법보다 많은 PM 배출량을 보였으며 이는 TEOM 법에 의하여 광학식 방법으로는 측정하지 못하는 SOF 성분이 포함되었기 때문으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부-한국산업기술진흥원 지정 계명대학교 “전자화자동차부품지역혁신센터”의 지원에 의한 것입니다. 또한 미국 오크리지 국립연구소(Oak Ridge National Laboratory)의 실험 장비를 이용하였으므로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Graboski, M. S. and McCormick, R. L., 1998, “Combustion of Fat and Vegetable Oil Derived Fuels in Diesel Engines,” *Prog. Energy combust. Sci.*, Vol. 24, pp. 125~164.
- (2) Agarwal, A. K., 2007, “Biofuels(Alcohols and Biodiesel) Applications as Fuels for Internal Combustion Engines,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 33, pp. 233~271.
- (3) United States Environmental Protection Agency, 2002, “A Comparative Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions,” EPA 420-P-02-001.
- (4) Lee, C. S., Park, S. W., and Kwon, S. I., 2005, “An Experimental Study on the Atomization and Combustion Characteristics of Biodiesel-Blended Fuels,” *Energy & Fuels*, Vol. 19, No. 5, pp. 2201~2208.
- (5) Song, J., Zello, V., and Boehman, A. L., 2004, “Comparison of the Impact of Intake Oxygen Enrichment and Fuel Oxygenation on Diesel Combustion and Emissions,” *Energy & Fuels*, Vol. 18, No. 5, pp. 1282~1290.
- (6) Boehman, A. L., Morris, D., and Szybist, J., 2004, “The Impact of the Bulk Modulus of Diesel Fuels on Fuel Injection Timing,” *Energy & Fuels*, Vol. 18, No. 6, pp. 1877~1882.
- (7) Szybist, J. P., Song, J., Alam, M., and Boehman, A. L., 2007, “Biodiesel Combustion, Emissions and Emission Control,” *Fuel Processing Technology*, Vol. 88, pp. 679~691.
- (8) Musculus, M., 2005, “Measurements of Influence of Soot Reduction on In-Cylinder Temperature and Exhaust NOx in a Heavy-Duty DI Diesel Engine,” SAE paper 2005-01-0925.
- (9) McCormick, R. L., Graboski, M. S., Alleman, T. L., and Herring, A. M., 2001, “Impact of Biodiesel Source Material and Chemical Structure on Emissions of Criteria Pollutants from a Heavy-Duty Engine,” *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 35, No. 9, pp. 1742~1747.