

인젝터 특성에 따른 2중 연료의 RCCI 연소에 관한 실험적 연구

성기안*

강원도립대학 자동차과

An Experimental Study on RCCI(Reactivity Controlled Compression Ignition) Combustion of Dual-fuel due to Injector Characteristics

Kian Sung*

Department of Automotive Engineering, Gangwon Provincial College, Gangwon 210-804, Korea

(Received 28 February 2011 / Revised 20 June 2011 / Accepted 8 August 2011)

Abstract : This study describes the characteristics of combustion and exhaust emission in the special engine applying a fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI) concept with two different energizing type (solenoid and piezoelectric) injectors for diesel injection. A diesel-gasoline mixed dual-fuel reactivity controlled compression ignition concept is demonstrated as a promising method to achieve high thermal efficiency and low emission in internal combustion engines for transportation vehicles. For investigating the combustion characteristics of RCCI, engine experiments were performed in a light-duty diesel engine over a range of injection timing and mixing rate of gasoline in mass. It was investigated that by increasing the nozzle hole diameter, increasing the combustion pressure and the net indicated mean effective pressure. NO_x and soot can be reduced by advancing start of injection in 84 mixing rate of gasoline in mass. The resulting operation showed that light duty engine could achieve 48 percent net indicated efficiency and 191[g/kW-hr] net indicated specific fuel consumption with lower levels of nitrogen oxides and soot.

Key words : RCCI(Reactivity Controlled Compression Ignition, 반응제어 압축착화), Dual-fuel(2중 연료), Injector (인젝터), LTC(Low Temperature Combustion, 저온 연소), Start of injection(연료분사시기)

1. 서론

최근 들어 일부 산유국들의 내정 불안과 원활하지 않은 오일 공급 등이 국제 유가에 영향을 미치고 있고, 각국의 온실가스 정책 등으로 자동차 기관의 유해 배출물 허용치가 크게 낮아짐으로써 고효율과 저공해를 동시에 실현하는 내연기관의 새로운 연소 기술의 개발 요구가 날로 증가되고 있다.

재래식 디젤유를 사용하는 차량용 압축착화기관(CI)은 점화착화기관(SI) 보다 높은 열효율을 가짐으로써 많이 사용되었으나, 연소실내 농후 및 희박 당량비 영역 존재와 고온연소로 질소산화물과 입자상

물질 등 유해 배출물이 많이 발생하는 문제점이 있었다.¹⁾ 이러한 문제점 해결 방안으로 커먼레일 시스템의 고압 연료분사 및 다단분사 적용과 DPF(Diesel Particular Filter), LNT(Lean NO_x trap)와 같은 배기후 처리 시스템 도입 등으로 유해 배출물 발생이 어느 정도 개선되었으나, 근본적인 고온 연소로 인한 배출물 생성 자체를 억제하는 데는 한계가 있고 DPF의 주기적인 재생과정 및 LNT의 축적된 NO_x 제거를 위한 주기적인 농후 당량비 운전으로 추가적인 연료소비 발생되어, 압축착화기관의 희박 연소를 통한 높은 연소 효율의 장점이 사라졌다. 농후 당량비 조건 운전이 필요 없는 희박 운전영역에서 NO_x를 저감하는 SCR(Selective Catalytic Reduction)의 경우

*Corresponding author, E-mail: kiansung@gmail.com

연료외의 추가적인 우레아(Urea)를 배기계에 분사하여 NO_x를 저감하지만 무효일을 함으로써 비효율적이고, 공급 인프라를 구축하는 것도 쉽지는 않다.²⁾

많은 연구자들이 앞서 언급한 여러 가지 단점을 보완하기 위해 실린더 내부 연소과정에서부터 NO_x와 Soot의 생성을 억제하는 연소기술들을 연구하고 있으며, 예혼합 저온 연소(Premixed low temperature combustion) 개념이 그 중 하나이다.

HCCI(Homogeneous charge compression ignition)와 PCCI(Premixed charge compression ignition) 연소 기술은 예혼합 저온연소(LTC)의 대표 격이지만 어려운 연소 제어 및 낮은 출력 등의 단점이 있다. 이러한 단점들을 개선하기 위하여 디젤-가솔린 2중연료를 이용한 예혼합 저온연소와 RCCI(Reactivity controlled compression ignition) 개념이 도입되었고 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.³⁾

RCCI 연소는 각각 다른 반응을 가지는 2개의 연료(디젤과 가솔린)를 연소실 내부에서 특정한 비율로 혼합하여 연소시킴으로써 배기 배출물 농도를 크게 낮추는 개념이다. 이러한 전략은 낮은 반응을 가지는 가솔린을 흡기과정에서 포트분사하고 높은 반응을 가지는 디젤을 직분사하여 부하 변동에 따른 가솔린 혼합비율의 정밀 제어를 통하여 이루어진다. 따라서 본 연구는 RCCI 연소 개념을 적용한 디젤-가솔린의 2중 연료 예혼합 저온연소에 따른 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 단기용 Light-duty 디젤기관과 구동방식이 다른 두 종류의 인젝터를 사용하여 고효율 저공해를 얻을 수 있는 기초 데이터 확보와 RCCI 연소 특성 등을 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2중 연료를 적용한 RCCI 연소 및 배기 특성을 관찰하기 위하여 University of Wisconsin-Madison, 엔진연구센터(ERC)에 설치된 디젤기관(GM 1.9L)을 재가공한 단기용 테스트 엔진과 그 주변 장치들이 본 연구에 사용되었다.

2.1 실험 장치의 구성

실험용 기관의 주요 제원은 Table 1에 나열되었고

Table 1 Engine specifications

Parameters	Nominal values
Engine type	DOHC direct injection
Bore / Stroke [mm]	82 / 90.4
Connecting rod [mm]	161
Compression ratio	15.24
Displacement [cc]	478
Piston bowl type	Mexican-hat
Swirl ratio	1.8~5.5
I/O / IVC [ATDC]	344 / -132
EVO / EVC [ATDC]	112 / -388

전체 실험장치 개략도는 Fig. 1에 도시하였다.

피스톤 보울은 Mexican-hat 형상으로 유전자 알고리즘(GA) 및 협각 직분사(NADI) 개념을 도입한 CFD 계산결과에 따라 독립 모델로 제작되었다.⁴⁾

RCCI 연소를 위한 디젤 직분사 및 가솔린 포트분사는 National Instruments의 cRIO-FPGA 새시와 C-모듈(NI-9411, NI-9215) 및 Drivven의 C-모듈(D00020, D000006)로 구성된 하드웨어 세트와 LabVIEW 제어 프로그램(jLabControl, jCA v3.0)으로 이루어졌으며, 솔레노이드 및 피에조 형식의 인젝터 구동과 5회 다단분사, 분해능 0.010 크랭크 각을 가지는 연료 분사시기(SOI), 분사기간 등을 제어하였다.

운환 및 냉각 계통, 흡기 및 배기 계통에 설치된 써모커플과 압력 트랜스듀서들은 저속 DAQ 시스템(NI, SCXI-1102B)에 연결되어 실시간 계측되었고, 향상된 PID 로직을 통하여 히터, 밸브, 레귤레이터 등 모든 액추에이터들이 되먹임 제어되었다.

실린더 압력은 피에조 압전소자형 압력 트랜스듀서(Kistler, 6125B)와 차지 앰프(Kistler, 5010)를 통해 출력되었고, 이 출력 신호는 3600[PPR] 엔코더 펄스와 동기 되어 매 사이클마다 실시간 실린더 압력 및 열발생을 계산에 사용되었다.

실린더 압력선도는 버퍼 메모리에 300개 사이클의 원형 데이터를 FIFO 방식으로 일시 저장하고, 그 평균값으로 부터 2가지 필터(Savitzky-Golay 및 Lowpass)를 적용하여 노이즈를 제거한 후 여러 가지 산술 계산에 이용되었다.

고압 연료펌프(Denso, HP2)는 5마력 유도 전동기에 의해 구동되며, 맥동 없는 정밀한 분사압력을 유지하기 위해 2개의 커먼레일을 직렬로 연결하여 고

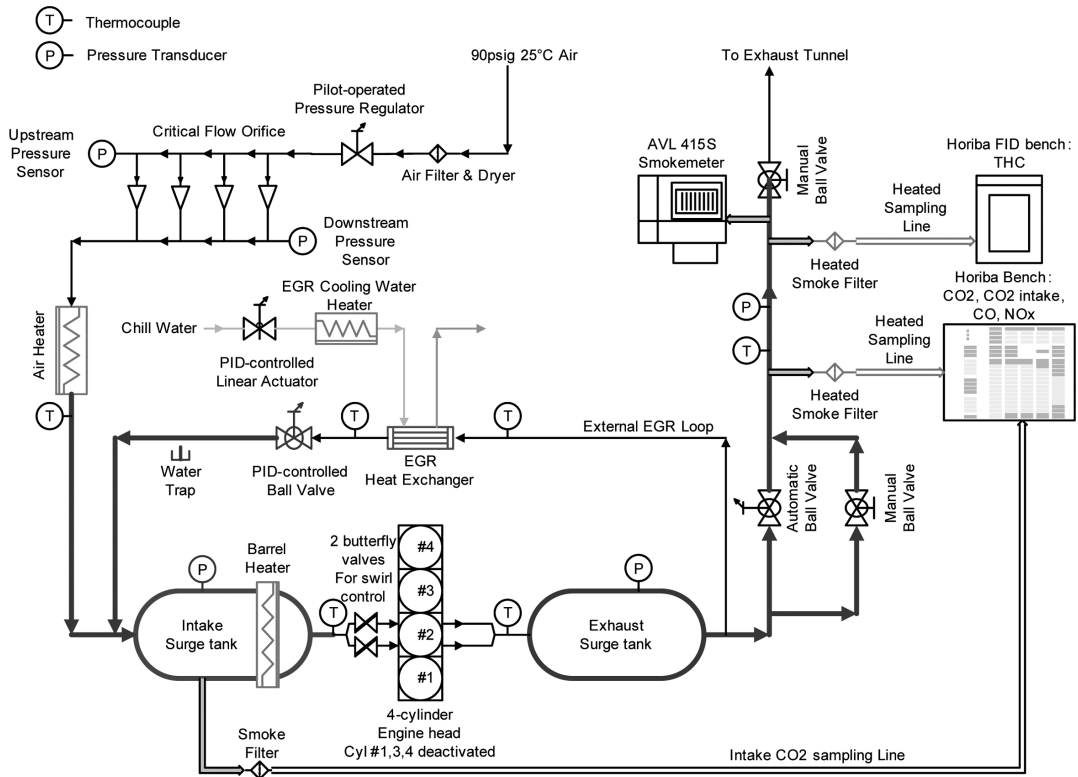


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

압 펌프쪽과 레일쪽 압력조절밸브(PCV)를 각각 250[Hz]과 1000[Hz]로 되먹임 듀티 제어하였다. 연료유량 측정은 온도 및 밀도가 자동으로 보정되는 유량계(Endress & Hauser, PROMASS-80) 2대를 디젤 및 가솔린 연료공급라인에 각각 삽입하여, $\pm 0.001[\text{mg}/\text{sec}]$ 의 정밀도를 갖는 유량 출력을 저속 DAQ 시스템에 접속하여 실시간 계측하였다.

리얼타임 초정밀 배기가스 성분(HC, O₂, CO₂, NO_x)을 분석하기 위하여 성분별 각각의 분석기로 구성된 Horiba 20-시리즈 테일파이프 벤치를 사용하였고, 매연측정기(AVL, 415S)를 이용하여 매회 4번의 샘플링 방식으로 Soot를 계측하였다.

실험에 사용된 가솔린은 시중에서 판매되는 옥탄가(R+M)/2 91.6이며, 디젤은 세탄가 46의 초저유황경유(ULSD)가 사용되었다.

2.2 실험 방법 및 조건

디젤-가솔린의 2중 연료를 적용한 RCCI 연소 및

배기 특성을 관찰하기 위하여 가솔린 포트분사(PFI) 방식과 디젤 커먼레일 직분사(DI) 방식을 도입하였고, 포트분사와 직분사에 사용된 각각의 인젝터의 특성들은 Table 2에 기술하였다.

디젤 직분사에 사용된 인젝터 형식은 솔레노이드와 피에조 압전소자 구동 방식으로, 두 종류의 구조 비교와 연료분사 과정에서 각 부품들의 거동을 Fig. 2에 도시하였다. 솔레노이드 인젝터의 경우 구동 전류가 인가되면 컨트롤 밸브를 잡아 당겨 노즐의 니들이 상승하면서 연료가 분사되지만, 피에조 압전소자 인젝터의 경우 구동 전류가 인가되면 피에조 스택이 팽창하여 컨트롤 밸브를 밀어내어 연료를 분사하는 방식이 실험에 사용되었다.

배기량의 약 100배 크기의 서지 탱크 2개가 흡기 및 배기 계통에 설치되어 단기통 기관의 맥동현상을 최소화하였고, 흡기계통에 3[kW] 히터를 삽입하여 기관속도 2000[rev/min]에서 140[°C]까지 흡입공기를 제어하여 일반적인 터보과급기 기관의 흡입공

Table 2 DI and PFI injector specifications

Parameters		Property
DI-solenoid	Injector manufacturer	BOSCH
	Nozzle	6×164μm
	Spray angle	144°
	Steady flow rate@100bar	880[cc/min]
DI-piezo	Injector manufacturer	DENSO
	Nozzle	8×128μm
	Spray angle	130°
	Fuel quantity@400bar, 0.79ms	30 [mm ³ /st]
PFI	Injector manufacturer	BOSCH
	Nozzle holes	3
	Spray angle	15°
	Steady flow rate@5bar	750[cc/min]

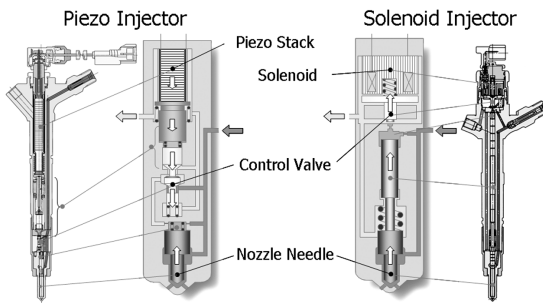


Fig. 2 Structure of piezo and solenoid injectors

기 조건을 모사하였다. 흡입 공기압과 공기량들은 압축된 공기를 전자제어식 압력조절기를 통해 0~6.2[bar]와 0~2[kg/min] 영역에서 균일하게 공급되도록 피드백 제어가 되었다.

특정 가솔린 혼합비율에서 두 종류의 커먼레일 디젤 인젝터를 사용하여 연료분사시기 변화에 따른

Table 3 Operation conditions for dual-fuel RCCI

Items	Conditions		
Engine speed [rev/min]	1900		
Net IMEP [bar]	5.4~5.8		
DI injection pressure [bar]	800		
PFI injection pressure [bar]	5		
Intake temperature [°C]	65		
Boost / Exhaust pressure [bar]	1.3 / 1.5		
EGR [%] / Swirl ratio	0 / 1.5		
Equivalence ratio	0.32~0.33		
Total fuel injection [mg/cyc]	14.5		
Premixed gasoline [% mass]	84		
DI injection SOI [°BTDC]	32	42	52

RCCI 연소 및 배기 특성을 비교하기 위하여 Table 3 과 같은 실험 조건을 설정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

예혼합 저온연소로 인하여 발생하는 양적 연소 노이즈 RI(Ringing Intensity)는 실린더 압력 트레이 스로부터 산출되고, 노크를 억제하는 권장 허용치는 2MW/m²이며 다음과 같이 유도되었다.⁵⁾

$$RI = \frac{1}{2\gamma} \frac{\left[0.05 \left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}\right]^2}{P_{\max}} \sqrt{\gamma R T_{\max}} \quad (1)$$

여기서 P_{max}, T_{max}는 각각 최대 실린더 압력 및 온도이며, 실린더 벽면 열전달의 영향을 받는 열발생율(HRR) 계산에 Gatowski⁶⁾가 정의한 온도함수의 비열비(γ)가 적용되었다.

$$\gamma = 1.392 - 8.13 \times 10^{-5} \times T(K) \quad (2)$$

2중 연료(디젤-가솔린)의 특정 가솔린 혼합비율에 따른 수치해석 결과⁴⁾에 따라, 인젝터 특성과 연료분사시기 변화에 따른 RCCI 연소 및 배기 특성을 관찰하기 위하여 84% 질량 기준 가솔린 혼합비율을 설정하였고, 실험 그룹을 크게 인젝터 형식(솔레노이드 및 피에조 압전소자)과 32에서 52[°BTDC]로 진각시키는 연료분사시기로 각각 구별하여 배기가스 성분을 분석하였다.

Fig. 3은 가솔린 혼합비율 질량기준 84%에서 연료분사시기의 변화 실험에 따른 압력선도와 열발생율을 도시하였다. 인젝터 형식에 무관하게 디젤 분사가 진각 될수록 연소구간(Combustion phasing)이 지연되고 최대 압력은 감소하며 발생시점은 지각됨을 보여주는데, 이러한 현상은 예혼합 RCCI 연소의 전형적인 경향이다. 이는 짧은 예혼합 연소구간에서 다량의 열을 방출하는 특성을 지닌 디젤 연료가 상대적으로 많은 가솔린 혼합비율과의 연소에서 연소구간이 더욱 줄어들고, 반면 세탄가가 낮은 가솔린 연료는 늦게 연소가 이루어져 최고 열발생율 시점이 지연되면서 높은 값을 보였다.

또한, 두 인젝터의 비교에서 솔레노이드 인젝터의 노즐 단면적(0.021mm²)은 피에조 압전소자 인젝터의 노즐 단면적(0.013mm²) 보다 크고 분사각도가

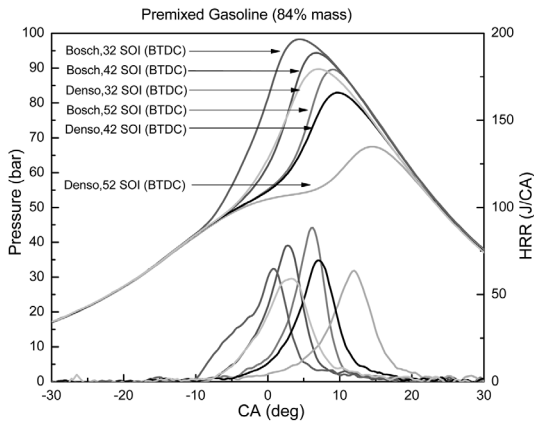


Fig. 3 Cylinder pressure and heat release rate over SOI sweep for 84% gasoline percent

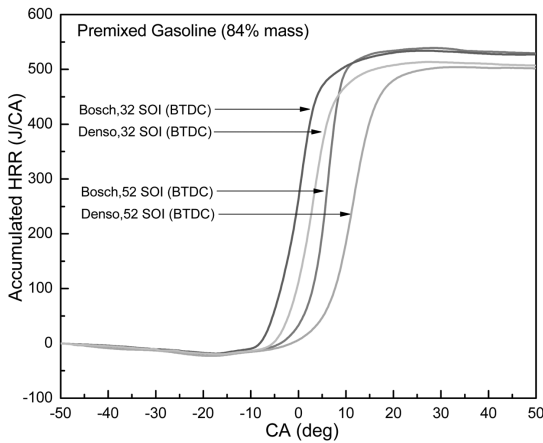


Fig. 4 Effect of SOI sweep on accumulated HRR

협소하지 않아, 분무도달거리가 증가하고 국소 당 량비(Local equivalence ratio)가 증가하여 최대 실린더 압력 및 열발생율이 증가함을 보여주었다.

RCCI 연소의 특징으로 분사시기를 진각 시키면 두 연료의 혼합이 더욱 균질하게 되고, 이는 국소 당 량비가 낮아지고 연소구간이 지연되어 최고 열발생율이 향상되는 경향을 보였다.

Fig. 4는 두 인젝터 형식에 대한 누적 열발생율(AHRR)을 도시하였다. 50% 연소기간(CA50)은 SOI 32, 42, 52 [°BTDC]에서 솔레노이드 인젝터의 경우 각각 0.1, 3.2, 5.9[°ATDC]이었고 피에조 압전소자 인젝터의 경우 각각 3.1, 6.4, 11.4[°ATDC]를 보였다.

두 가지 디젤 연료 분사시기(32와 52 °BTDC)로부터, 총 노즐 단면적이 큰 솔레노이드 인젝터 구동형

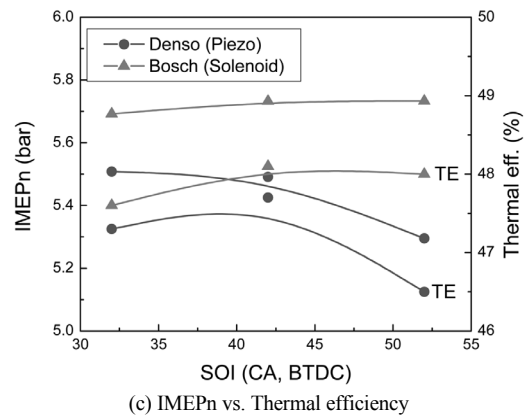
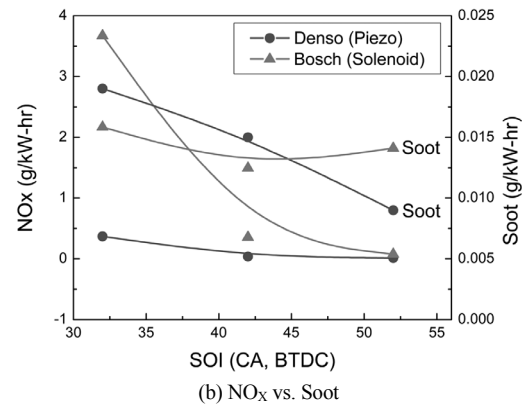
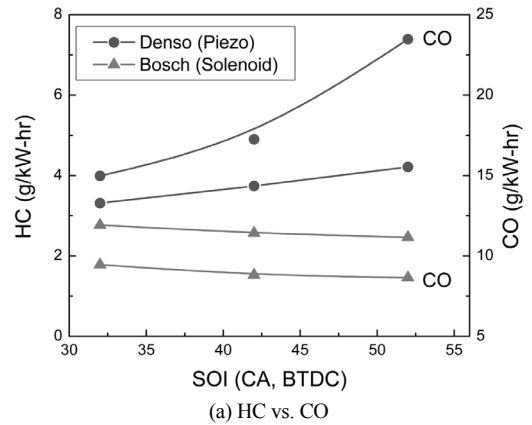


Fig. 5 Emissions and performance of dual-fuel RCCI over a range of SOI from 32 to 52[°BTDC] at 84% gasoline percent

식(0.127mm²)이 피에조 인젝터(0.103mm²)에 비하여 화염전파가 빨리 일어났음을 보여주었다.

Fig. 5는 연료분사시기와 인젝터 형식 변화에 따른 배기가스 성분(HC, CO, NO_x, Soot) 및 연소 성능

(ISFC, PRR, IMEP, 열효율)을 분석한 그래프이다.

도시비연료소비량 ISFCn는 32[°BTDC]에서 진각 시키면, 솔레노이드 인젝터 형식이 피에조 인젝터 형식에 비교하여 낮은 연료소비율을 보였는데, 이는 예혼합율이 상승하여 착화 지연되어 압축 상사 점후에 연소가 이루어진 결과이다. 아울러, 평균유효압력, 최대열발생율 및 이론열효율들은 연료소비율과 상반되는 경향을 보였다.

HC와 CO의 배출물 특성을 보면, 피에조 인젝터의 경우 분사시기가 진각 될수록 배출물의 농도가 약간 증가함을 보였지만 솔레노이드 인젝터의 경우 대동소이 하였고, 이때 실험 중 램다미터로 측정된 당량비는 솔레노이드 및 피에조 인젝터 각각 0.347 및 0.338이었다. 이는 피에조 인젝터의 협각분무각과 조기 분사에 따른 연료의 벽면 흡착으로 생성된 미연소 탄화수소의 부분적 산화로 인하여 CO 배출물의 양이 증가되었다고 유추된다.

실험에 사용된 솔레노이드 인젝터가 피에조 압전 소자 인젝터 보다 높은 이론 열효율 및 연료소비율과 낮은 HC와 CO를 보였지만 NO_x는 약간 상회하였고 Soot는 유사함을 보였다. 두 인젝터 모두 연료 분사시기가 진각 되면 NO_x와 Soot는 US2010 Heavy-duty 카테고리(각각 0.27g/kW-hr 및 0.013g/kW-hr)를 만족하는 수준으로 저감되었고, 특정 운전연역에서 48% 이론 열효율과 191 [g/kW-hr] 정미도시연료소비율을 기록하였다.

4. 결론

2중 연료(디젤-가솔린)의 가솔린 혼합비율 질량 기준 84%에서 인젝터 특성과 연료분사시기 변화에 따른 RCCI 연소 및 배기 특성을 관찰하기 위하여 EGR없는 중부하에서 다수의 실험이 수행되었고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 디젤-가솔린 연료 예혼합을 통한 RCCI 저온 연소 특성이 재현되었고, 인젝터 형식에 무관하게 디젤 분사가 진각 될수록 연소구간이 지연되어 최대 실린더 압력은 감소하고 발생시점은 지각되었다.
- 2) 솔레노이드 인젝터를 적용한 연료분사시기 42~52 [°BTDC] 동안 48%의 이론 열효율과 191 [g/kW-hr]의 정미 연료소비율을 얻었고, NO_x와 Soot는

US2010 Heavy-duty 카테고리(각각 0.27g/kW-hr 및 0.013g/kW-hr)를 만족하는 수준으로 감소되었다.

- 3) RCCI 연소 개념을 적용한 2중연료 예혼합 저온 연소 전략은 약 5.5[bar] 정미 평균유효압력의 부하에서 어떠한 배기후처리장치 없이 유해 배출물을 US2010 수준으로 낮출 수 있음을 보임으로써, 고효율 저공해 상용 내연기관의 출현 가능성을 보였다.

후 기

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2010-0020907)입니다.

References

- 1) R. G. Hyun and C. S. Lee, "The Effect of Multiple Injections on the Stability of Combustion and Emissions Characteristic in a Passenger Car Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.15, No.4, pp.1-9, 2007.
- 2) K. A. Sung and R. Reitz, "Experimental Study of Emission Reduction for Near-stoichiometric Diesel Combustion Using a 3-Way Catalyst," Int. J. Engine Research, Vol.10, No.5, pp.349-357, 2009.
- 3) R. Hanson, S. Kokjohn, D. Splitter and R. Reitz, "An Experimental Investigation of Fuel Reactivity Controlled PCCI Combustion in a Heavy-duty Engine," SAE 2010-01-0864, 2010.
- 4) D. Wickman, K. Senecal and R. Reitz, "Diesel Engine Combustion Chamber Geometry Optimization Using Genetic Algorithms and Multi-dimensional Spray and Combustion Modeling," SAE 2001-01-0547, 2001.
- 5) J. A. Eng, "Characterization of Pressure Waves in HCCI Combustion," SAE 2002-01-2859, 2002.
- 6) J. Gatowski, E. Chun, K. Nelson and B. Heywood, "Heat Release Analysis of Engine Pressure Data," SAE 841359, 1984.