

압축착화 엔진에서 디젤-가솔린 Dual Fuel이 연소 및 배기 특성에 미치는 영향

권석주* · 차준표* · 성기안** · 박성욱****

Fuel Injection System on Combustion and Exhaust Emissions Characteristics in Compression Ignition Engines

Seokjoo Kwon, Junepyo Cha, Kian Sung and Sungwook Park

ABSTRACT

The present study describes the characteristics of combustion and exhaust emissions in compression ignition engines using diesel-gasoline dual fuel. For investigating combustion characteristics, diesel fuel was injected directly in a single-cylinder compression ignition engine with a common-rail injection system and gasoline fuel was injected into a premixed chamber installed in an intake port. In order to investigate exhaust emission characteristics, exhaust gas was measured by emission analyzer and smoke meter.

The experimental results showed that cases of diesel-gasoline dual fuel combustion exhibited extended ignition delay and reduced peak combustion pressure compared to those of directly injected diesel fuel cases. Furthermore, premixed gasoline-air mixture reduced NOx emissions due to low peak of rate of heat release (ROHR).

Key Words : Diesel-gasoline dual fuel, CI engine, Combustion characteristic, Emission characteristics

1. 서론

디젤 엔진은 자동차와 조선업 그리고 소형 발전소에서 사용되는 주요한 동력장치이다. 일반적으로 디젤 엔진의 연소 특성은 4행정 사이클의 압축과정에서 디젤 연료의 자착화 특성을 이용한 압축착화연소(Compression ignition combustion)가 사용된다는 것이다. 고압 상태를 생성하기 위하여 높은 압축비의 실린더를 이용하며, 이로 인하여 가솔린 엔진에 비해 뛰어난 열효율과 연료 소비율이 우수한 특성이 있다. 연료는 희박한 영역에서 연소되어 미연탄화수소(Unburned Hydrocarbon, UHC)와 이산화탄소(Carbon dioxide, CO₂)가 적은 장점이 있으며 단점으로는 입자상물질(Particulate Matter, PM)과 질소산화물(Nitrogen Oxide, NOx) 배출물이 많이 발생하는 경향이 있다[1,2].

앞서 나열한 PM과 NOx 배출물이 많이 발생하는 디젤 엔진의 단점을 극복하기 위하여 균일 예혼합

압축 착화(Homogeneous charge compression ignition, HCCI) 연소 전략이 연구되고 있다. HCCI는 연소실 내 혼합기를 균일하게 하여 국부적으로 연료가 농후한 영역을 줄여줌으로서 입자상물질의 생성영역을 감소시킨다. 그리고 급격한 열발생 구간을 줄여서 질소 산화물의 생성영역을 감소시키는 방법이다. 하지만 HCCI는 혼합기와 연소실 내부의 압력과 온도에 의하여 착화되기 때문에 연소제어의 어려움과 출력이 낮은 문제점을 갖고 있어서 이러한 단점을 극복하기 위하여 Dual fuel 연소 전략을 사용하여 PM과 NOx 배출물을 감소하는 연구가 최근에 지속되고 있다[3,4].

Dual fuel은 옥탄가(Octane number)가 높은 연료를 흡기과정 중에 분사하여 연소실 내에 균일한 혼합기를 형성하고 높은 세탄가(Cetane number)를 가진 연료를 실린더 내에 직접 분사하여 착화시킴으로써 미리 형성된 균일한 혼합기와 함께 연소시키는 방법이다.

Patrick[5] 등은 공랭 디젤 발전기와 단기통 엔진에서 가솔린 포트 분사와 디젤을 사용한 Dual fuel PCCI(Premixed Charge Compression Ignition) 전략에 대하여 실험적 연구를 하였고, Danlele[6] 등은 HCCI

* 한양대학교 대학원

** 강원도립대학 자동차과

*** 한양대학교 기계공학과

† 연락처자, parks@hanyang.ac.kr

와 PCCI 연소 전략이 PM과 NOx의 저감에 탁월한 효과를 보이지만 점화 시점을 제어하기 힘든 단점을 제시하였으며, 이를 해결하기 위해 디젤-가솔린 Dual fuel을 사용하여 연소구간(Combustion phasing)을 제어하는 연구를 수치해석기법을 사용하여 연구하였다.

따라서 본 연구에서는 옥탄가가 높은 가솔린을 이용하여 예혼합된 가솔린 연료와 직접 분사된 디젤 연료의 혼합률이 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 단기통 압축착화 엔진을 사용하여 실험하였다. 예혼합 과정에서는 세탄가가 낮은 가솔린을 사용하여 조기 착화를 억제하였고, 연소실 내 직접 분사에는 세탄가가 높은 디젤을 사용하여 다양한 분사시기에 대하여 실험하였다. 또한 총 연료 분사량이 10 mg일 때 연소실 내 디젤만을 직접 분사한 $G_{ratio}0\%$ (diesel 10 mg/cyc.)와 직접 분사하는 디젤과 예혼합하는 가솔린의 분사량의 비를 $G_{ratio}60\%$ (gasoline 6 mg/cyc. + diesel 4 mg/cyc.), $G_{ratio}70\%$ (gasoline 7 mg/cyc. + diesel 3 mg/cyc.)로 실험하여 그 결과를 비교하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험 장치

단기통 압축 착화 엔진을 구성하여 Dual fuel 연소전략에 대한 연소 및 배기 특성을 연구하였으며 실험에 사용된 엔진의 주요 제원과 연소실내 직접 분사하는데 사용되는 인젝터의 세부 사항을 Table 1에 나타내었다.

실린더의 보어와 스트로크가 각각 75 mm와 84.5 mm로 배기량이 373.3 cc인 단기통 디젤 엔진을 구성하였으며, 압축비가 17.8:1인 이 엔진은 55 kW의

Table 1. Specifications of the test engine

Description		Specification
Type		Single-cylinder DI engine
Bore×Stoke [mm]		75×84.5
Displacement volume [cc]		373.3
Compression ratio		17.8
Valve type		DOHC 4
Intake valve	Open	BTDC 8°C
	Close	ABDC 52°C
Exhaust valve	Open	BBDC 8°C
	Close	ATDC 38°C
Fuel injection system		Bosch common-rail
Number of injection hole		6
Nozzle hole diameter [mm]		0.128
Spray angle [deg.]		156

DC 동력계를 이용하여 엔진의 속도를 1,200 rpm으로 제어 및 고정하였다. 예혼합을 위한 가솔린 인젝터의 분사시기를 제어하는 방법으로는 GDI 인젝터에서 1,200 rpm 엔진회전속도에 맞추어 고정적으로 분사하는 방법을 사용하였다. 인젝터의 연료량 실험을 하여 가솔린이 4 mg과 3 mg이 일정하게 분사될 수 있도록 분사시간(Injection duration)을 설정하여 균일한 예혼합기가 형성되도록 유도하였다.

디젤 인젝터의 분사시기를 제어하는 방법은 크랭크축에 연결된 로타리 엔코더(Hanyoung)와 2:1 기어비의 캠축과 연결된 포토센서(Autonics)를 사용하여 실린더의 압축 TDC를 인지하여 기준점을 결정하였고 그 이후 타이밍 펄스 발생기(Timing pulse generator, Blue planet)에서 분사시기를 제어하였다. 연소실에 직접 분사되는 디젤 인젝터의 분사량을 제

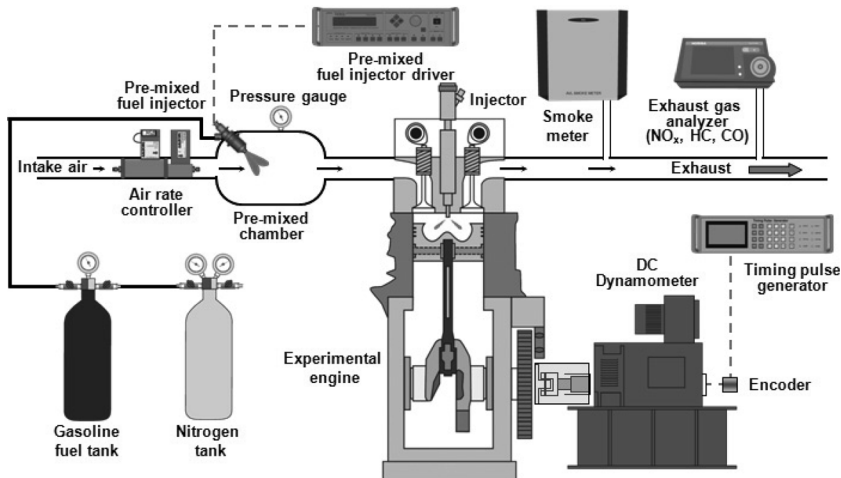


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

어하기 위하여 인젝터 드라이버(TDA 3300, TEMS)를 사용하였으며, 인젝터의 전류 인가 시점(Start Of Energizing, SOE)에 따라 분사되었다. 가압 방식으로는 두 개의 고압펌프(HSF-300, Haskel)를 병렬로 연결하여 커먼레일(Common-rail, Bosch) 내 고압의 연료를 공급하였다. 연소해석을 위하여 피에조 압전 소자 방식의 압력센서(6057A80, Kistler)를 엔진의 글로우 플러그 자리에 설치하였다. 센서에서 나오는 압력 데이터는 Amplifier(Charge meter Type 5015, Kistler)를 지나서 DAQ(Data Acquisition Board) (BNC-2110, NI)에서 취득하였다. DAQ보드는 컴퓨터에 설치된 칩셋(PCI-MIO-16E-1, NI)과 연결되어 연소실내 압력데이터를 실시간으로 취득하였다. 배기가스 분석을 위하여 각종 유해배출가스(예를 들어, HC, CO, CO₂, O₂)의 농도를 측정하는 배기분석기(MEXA-554JK, Horiba)와 Soot의 농도를 측정하는 매연측정기(415S, AVL)를 이용하였다[7].

디젤-가솔린 연료의 Dual fuel 연소방법이 가능하도록 Fig. 1과 같이 Dual fuel 시스템을 구성하였다. 흡입과정에서 분사된 예혼합 가솔린이 흡입공기와 균일한 혼합기를 이루게 하기 위하여 흡기챔버(Intake chamber)를 설치하였고 예혼합 연료를 분사하기 위한 GDI(Gasoline Direction Injection) 인젝터를 흡기챔버의 상부에 설치하였다. 예혼합 인젝터에서 3 MPa의 일정한 압력이 분사되기 위하여 질소가스로 가압한 이후 가솔린이 주입된 예혼합 연료 탱크에 연결하였다. 예혼합 연료는 인젝터 드라이버(TDA-3200H, TEMS)를 이용하여 분사량을 제어하였다. 흡입 유량은 유량계(GFC67, Aalborg)를 설치하여 일정량으로 흡입이 되도록 제어 및 고정하였다.

연소특성을 해석하기 위하여 열역학 제 1법칙을 사용하여 아래와 같은 열발생률(Rate Of Heat Release, ROHR) 식을 나타내었다. 연소실 내부를 흡기와 배기 밸브가 모두 닫힌 고립계에서의 이상기체로 가정하였습니다. 아래 식은 크랭크의 각도 변화에 대하여 계산되는 열발생률을 나타낸다.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\kappa}{\kappa-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\kappa-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad [\text{J/deg.}] \quad (1)$$

이 식에서 사용된 κ 는 이상기체의 비열비를 나타내고 P , V , θ 기호는 각각 압력, 체적, 크랭크 각도를 나타낸다.

2.2. 실험 방법

본 연구는 디젤 엔진에서 디젤-가솔린 Dual fuel 이 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 가솔린은 공기와 연료의 예혼합기를 조성하기

Table 2. Experimental conditions

Item		Experimental condition	
Engine speed [rpm]		1,200	
Oil and coolant temperature [°C]		70	
Mass flow rate of intake air [kg/h]		10.7	
EGR [%]		w/o EGR	
Direct injection pressure [MPa]		100	
Premixed injection pressure [MPa]		3	
SOE of direct injection [°BTDC]		0, 9, 20, 30	
Pre-mixed port injection		Intake stroke	
Fueling rate [mg/cyc.]	G _{ratio} 0%	Port injection(Gasoline) Direct injection(Diesel)	- 10 mg
	G _{ratio} 60%	Port injection(Gasoline) Direct injection(Diesel)	6 mg 4 mg
	G _{ratio} 70%	Port injection(Gasoline) Direct injection(Diesel)	7 mg 3 mg

위하여 흡기챔버에서 분사하였고 디젤은 TDC에서 BTDC 30°CA까지 분사시기를 진각시키며 연소실 내 직접 분사(direct injection)하였다. 이러한 실험 조건을 Table 2에 나타내었다.

실험에서 연료의 분사량은 10 mg으로 고정하였으며 실험 조건은 총 세 가지로 나뉜다. 첫 번째 조건인 G_{ratio}0%는 가솔린의 분사 없이 연소실에 직접적으로 분사되는 디젤을 10 mg으로 고정하였다. 두 번째 조건인 G_{ratio}60%은 엔진의 흡입과정 중 흡기챔버에서 예혼합 분사되는 가솔린의 양을 6 mg으로 분사한 뒤 디젤의 양을 4 mg으로 하였고, 마지막 조건인 G_{ratio}70%은 가솔린의 양 7 mg과 디젤의 양 3 mg을 사용하여 총 연료량 대비 가솔린의 포함량인 G_{ratio}로 표현하였다. 분사 시작 시점을 나타내는 SOE (Start Of Energizing)는 TDC에서 BTDC 30°CA까지 진각하여 분사하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 연소 특성

Fig. 2는 1,200 rpm로 회전하는 엔진의 분사시점이 BTDC 20°CA일 때 크랭크 각도 증가에 대한 연소실 내 압력그래프와 이 압력 값으로 식 (1)에 의해 계산된 열발생률 그래프를 나타낸 것이다. 직접 분사된 디젤과 비교하여 예혼합 된 가솔린의 비율이 증가할수록 실린더 내 압력증가의 구배가 감소하였고 최고 연소압력도 다소 낮아짐을 확인할 수 있었다. 이는 디젤 연료는 짧은 예혼합 연소구간에서 다량의 열이 방출되는 특성을 가지고 있는데 가솔린 연료의 양이 증가할수록 상대적으로 디젤 연료의 양

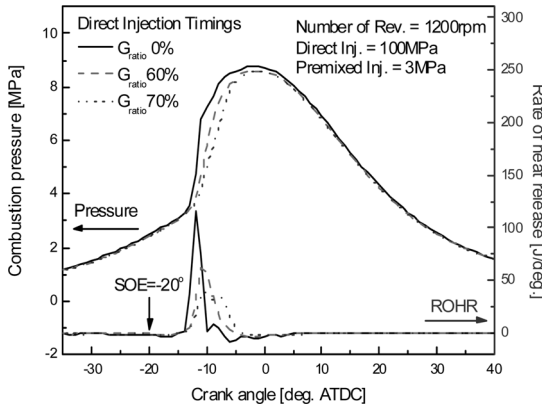


Fig. 2. Effect of diesel-gasoline on combustion pressure and rate of heat release at BTDC 20°C.

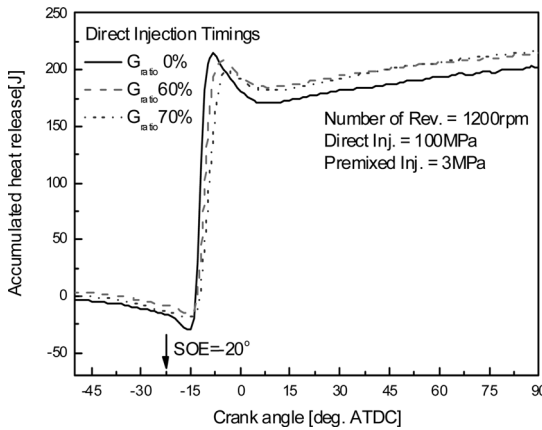


Fig. 3. Effect of diesel-gasoline on accumulated heat release at BTDC 20°C of SOE.

이 줄어들게 된다. 그 결과, 디젤 연료의 연소구간이 줄어들고 상대적으로 세탄가가 낮은 가솔린 연료는 디젤보다 늦게 연소가 이루어져서 압력의 증가율이 둔화 되었다고 판단된다. 열발생률(ROHR) 그래프에서도 가솔린의 양이 증가할수록 최고 열발생률은 감소하였으며 열발생률이 산출기간도 길어진 것을 확인할 수 있었다. $G_{ratio}70\%$ 일 때 가장 긴 연소구간을 가지는 것으로 관찰되었으며 이는 소량으로 분사된 디젤의 연소는 시작 후 급격히 소멸되지만 상대적으로 분사량이 많고 세탄가가 낮은 가솔린은 착화를 지연시키는 역할을 하여 연소실 내에서 연소가 길어진 것으로 판단되어진다. Fig. 3에 나타난 누적 열발생량은 연소실 내 압력데이터에 의해 계산된 크랭크 각도의 증가에 대한 열발생률을 점차적으로 누적한 값이다. $G_{ratio}0\%$ 인 경우 BTDC 15°C 부근에 누적 열발생률의 최저점이 관찰되었다. 이는 디젤 연료가 분사되며 액체 연료가 기체화 상변화 현상으로 증발잠열로 인한 것이란 판단되었

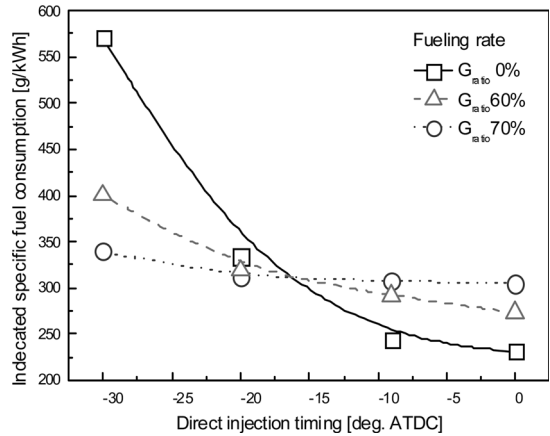


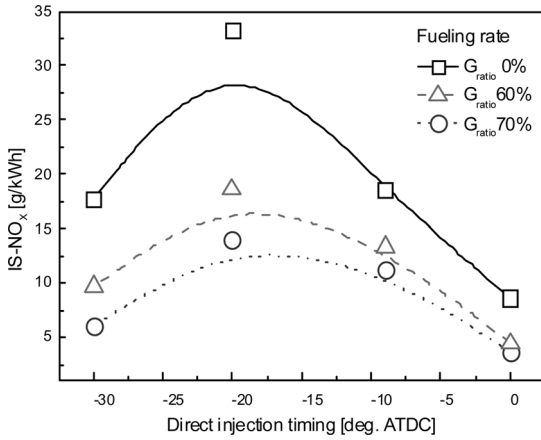
Fig. 4. Characteristics of ISFC according to diesel-gasoline mixing ratio.

다. 그리고 누적 열발생량 그래프는 TDC 부근에 최고값을 나타낸 이후 하강하는 구간이 나타나는데 $G_{ratio}0\%$ 이 가장 큰 하강 폭을 가지고 있으며 그 양은 $G_{ratio}60\%$, $G_{ratio}70\%$ 순으로 하강 폭이 줄어들었다. 그 이유는 디젤 연료의 짧은 예혼합 연소구간 이후에 연소실 내부에 존재하는 가솔린이 연소하여 누적 열발생량의 하강 폭이 줄어든 것으로 판단된다. 최종적으로 열발생량의 누적치는 $G_{ratio}70\%$ 일 때 가장 많은 열발생량이 나타남을 알 수 있었다.

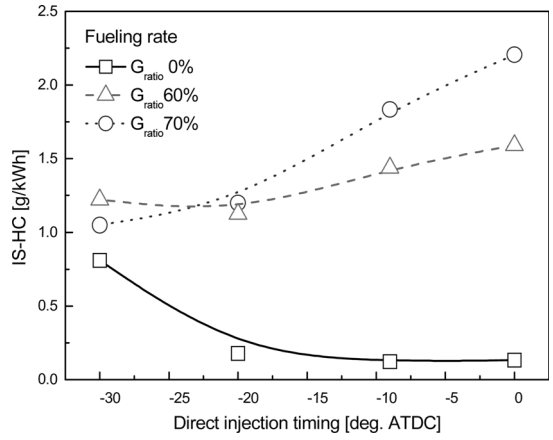
Fig. 4는 BTDC 0°C에서 BTDC 30°C까지 분사시기가 진각됨에 따라 ISFC(Indicated specific fuel consumption)의 변화를 나타낸 그래프이다. ISFC 값은 연료를 소비하여 효율적인 열발생이 이루어졌는지를 나타내는 척도가 되며, 같은 양의 연료를 사용하여도 ISFC의 값이 작을수록 연료가 효율적으로 연소되어 많은 양의 열이 발생되었다는 의미가 된다. 분사시기가 BTDC 20°C보다 진각 되었을 때 디젤-가솔린의 ISFC가 디젤만 사용하였을 경우보다 작은 값을 가지는 현상이 관찰되었다. 이는 Fig. 2에서 나타난 것처럼 흡입 과정 중 세탄가가 낮은 가솔린 연료의 함유로 인하여 자착화성이 떨어진 연료는 압축과정에서 연소를 착화지연 시키고 TDC 부근에서 연소가 이루어지도록 유도 되었다. 결과적으로 BTDC 20°C보다 지각될 경우 Dual fuel 연소전력이 효율적으로 연료를 소비하였다고 판단되었다.

3.2. 배기 특성

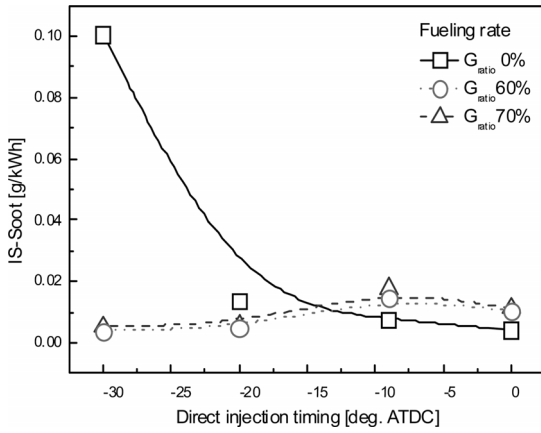
Fig. 5(a)는 분사시기가 지각됨에 따라 NOx의 배출량을 나타내는 그래프이다. $G_{ratio}0\%$ 인 경우 일반적인 디젤 엔진에서의 NOx가 배출되는 특성을 나타내며 가솔린 양이 증가 할수록 분사시기에 대한 NOx의 증가폭이 감소하였다. NOx의 생성원인은 주



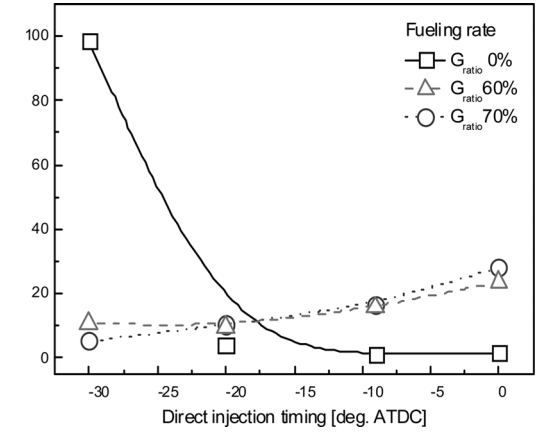
(a) IS-NOx



(a) IS-HC



(b) IS-Soot



(b) IS-CO

Fig. 5. NOx and soot characteristics of effect of diesel-gasoline mixing to injection timing.

Fig. 6. HC and CO characteristics of effect of diesel-gasoline mixing to injection timing.

로 고온 상태에서 흡입 공기 중의 질소와 산소가 화합하여 생성된다. Fig. 2를 살펴보면 예혼합된 가솔린의 영향으로 최고 연소 압력과 압력 그래프의 증가율이 감소하였다. 이로 인하여 연소실 내 최고 온도가 감소하였으며 실린더 내 낮은 연소 온도는 고온에 지배적인 Thermal NOx의 생성을 억제하는 역할을 하는 것으로 판단되었다.

Fig. 5(b)는 분사시기에 대한 Soot의 특성을 나타내고 있다. 분사시기가 TDC 근처의 경우에는 세 분사 조건에서 비슷한 양의 Soot가 배출되었으며 연료 중 가솔린의 양이 포함됨에 따라 Soot의 생성이 다소 증가하는 현상이 나타났다. 디젤-가솔린을 사용한 Dual fuel인 경우에는 연소시기가 진각 되었을 경우 Soot 배출량이 소폭 감소하는 경향을 나타내었으나, $G_{ratio}0\%$ 인 경우는 분사시기가 BTDC 20°CA보다 진각 되었을 경우에 Soot의 배출량이 급격하게 증가되는 특성을 보여주었다.

Fig. 6(a)는 분사시기에 따라 HC의 배기 배출물

특성을 나타내고 있다. 연료 중 가솔린양이 증가할수록 전반적으로 디젤만 분사하였을 경우보다 HC가 많이 배출되는 특성을 보였다. 이는 흡기 포트에서 예혼합된 가솔린이 연소실 벽면에서의 화염 소실, 틈새체적에 남은 미연소 혼합기, 유회막에 흡착된 연소성분 등으로 인하여 불완전연소로 인한 영향으로 판단되어진다.

Fig. 6(b)는 CO의 배출물 특성을 나타내고 있다. 분사시기가 BTDC 20°CA보다 진각되자 $G_{ratio}0\%$ 의 CO 배출량이 증가하는 특성을 나타내었다. 이는 조기 분사로 인한 불완전연소의 영향으로 판단되어진다. TDC 부근에서 $G_{ratio}60\%$ 과 $G_{ratio}70\%$ 는 실험 중 램다미터(ETAS)로 측정된 램다 값이 각각 2.25와 2.42을 나타내었다. 이는 당량비가 0.4와 0.41 사이인 것을 나타내며 이러한 희박 연소에서 CO의 배출물과 HC의 배출물의 양은 유사한 경향성을 가지며 증가한다. 그 원인은 폭발과 배기 행정 사이에 틈새체적과 연료의 벽면 흡착으로 생성된 미연소 탄

화수소의 부분적 산화로 인해 CO 배출물의 양이 증가되었다고 판단된다[8].

4. 결론

본 연구에서는 압축착화기관에서 디젤-가솔린 Dual fuel이 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 실험을 수행하였고 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Dual fuel 연소에 사용된 연료의 가솔린양이 증가할수록 전체 연료의 세탄가가 낮아져 연료의 착화성이 감소하게 되며 그 결과 착화지연기간이 길어지는 영향을 주었으며 대조적으로 그 양이 감소한 디젤의 영향으로 예혼합 연소구간에서 열발생률이 줄어들고 연소압력의 최고값이 감소하는 현상이 나타났다.

2) 세탄가가 낮은 가솔린함유로 인하여 분사시점이 BTDC 20°CA보다 지각될 경우 디젤만 사용하였을 경우보다 ISFC의 값이 줄어들었다. 이는 분사시점이 BTDC 20°CA보다 지각될 경우 Dual fuel 연소전략이 효율적으로 연료를 소비한 것으로 판단되었다.

3) 혼합기 내 가솔린의 예혼합률이 증가함에 따라 NOx는 디젤만 분사한 경우와 비교하여 분사시기 전 영역에서 감소하였다. Soot는 그 양이 전체적으로 유사하였고 분사시기가 BTDC 20°CA보다 진각 되었을 경우 그 양이 소폭 감소하는 경향을 나타내었다.

4) 혼합기 내 가솔린의 불완전연소에 의하여 가솔린의 예혼합률이 증가할수록 HC는 크게 증가하였으며 CO는 TDC 부근에선 다소 증가하는 현상이 관찰되었으나 BTDC 20°CA 이후의 분사시기에서는 $G_{ratio}0\%$ 의 CO의 배출이 월등히 증가하게 되었다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. 2010-0020907).

참고문헌

- [1] Junepyo Cha, Seokjoo Kwon, Jeong Yun Heo, Chang Sik Lee, Sung Wook Park, "Effect of gasoline-premixing on combustion and exhaust emissions characteristics in diesel enginepartial homogeneous charge compression ignition engine", The 40th KOSCO Symposium, 2010, pp. 157-162
- [2] Chang Sik Lee, Young Hoon Yoon, Myung Yoon Kim, "Effect of cooled-EGR on the characteristics of performance and exhaust in a HCCI diesel engine", Transactions of KSAE, Vol. 13, No. 5, 2005, pp. 35-41
- [3] Scott Curran, Vitaly Prikhodko, Kukwon Cho, Charles Sluder, James Parks, Robert Wagner, Sage Kokjohn and Rolf Reitz, "In-Cylinder Fuel Blending of Gasoline/Diesel for Improved Efficiency and Lowest Possible Emissions on a Multi-Cylinder Light-Duty Diesel Engine", SAE 2010-01-2206
- [4] Kazuhisa Inagaki, Takayuki Fuyuto, Kazuaki Nishikawa, Kiyomi Nakakita, Ichiro Sakata, "Dual-Fuel PCI Combustion Controlled by In-Cylinder Stratification of Ignitability" SAE 2006-01-0028
- [5] Patric B. Dunbeck, Rolf D. Reitz, "An Experimental Study of Dual Fueling with Gasoline Port Injection in a Single-Cylinder, Air-Cooled HSDI Diesel Generator", SAE 2010-01-0869
- [6] Danlele Tamagna, Youngchul Ra, Rolf D. Reitz, "Multidimensional Simulation of PCCI Combustion Using Gasoline and Dual-Fuel Direct Injection with Detailed Chemical Kinetics", SAE 2007-01-0190
- [7] Seung Hyun Yoon, Myung Yoon Kim, Dae Sik Kim, Chang Sik Lee, "Effects of Compression Ratio and Spray Angle on Combustion Characteristics in a Premixed Charge Compression Ignition Engine", KSAE 2005 Annual Conference, pp. 217-222
- [8] Heywood, J. B., "Internal combustion engine fundamentals", McGraw-Hill, New York, 1988, pp. 592-596