

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.7.609>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

직접분사식 가솔린엔진에서 운전조건에 따른 바이오에탄올의 연소 및 배기배출물 특성

윤 승 현* · 박 수 한**†

* 영남이공대학교 자동차계열, ** 전남대학교 기계공학부

Effect of Engine Operating Conditions on Combustion and Exhaust Emission Characteristics of a Gasoline Direct Injection(GDI) Engine Fueled with Bio-ethanol

Seung Hyun Yoon* and Su Han Park**†

* Division of Automotive Engineering, Yeungnam College of Science&Technology,

** School of Mechanical Engineering, Chonnam Nat'l Univ.

(Received March 23, 2015 ; Revised May 8, 2015 ; Accepted May 10, 2015)

Key Words: Bio-ethanol(바이오에탄올), Alternative Fuel(대체연료), Combustion Characteristics(연소특성), Exhaust Emission(배기배출물), Gasoline Direct Injection Engine(직접분사식 가솔린엔진), Excess Air Factor(공기 과잉률)

초록: 본 연구는 직접분사식 가솔린엔진에서 공기 과잉률 및 바이오에탄올-가솔린 혼합연료의 혼합비에 따른 연소특성과 배기배출물 특성을 실험적으로 규명한 것이다. 다양한 공기 과잉률 및 혼합비 조건에서 실험을 수행하였으며, 연소실 압력, 열발생률, 연료소비율 등을 통해 연소특성을 분석하였으며, 배기배출물 특성은 미연탄화수소(HC), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x) 분석을 통해 확인하였다. 혼합연료의 실험결과는 100% 가솔린 및 바이오에탄올 실험결과와 비교하였다. 실험결과 최고연소압력과 열발생률, 제동연료소비율은 혼합비의 증가에 따라 증가하였으며, CO, HC, NO_x와 같은 배기배출물은 바이오에탄올 혼합비율이 증가함에 따라 감소하였다. 혼합연료의 배기배출물 수준은 가솔린 보다 낮게 나타났다.

Abstract: In this study, the combustion and exhaust emission characteristics in a gasoline direct injection engine with variations of the bio-ethanol-gasoline blending ratio and the excess air factor were investigated. To investigate the effects of the excess air factor and the bio-ethanol blends with gasoline, combustion characteristics such as the in-cylinder combustion pressure, rate of heat release (ROHR), and the fuel consumption rate were analyzed. The reduction of exhaust emissions such as carbon monoxide (CO), unburned hydrocarbon (HC), and nitrogen oxides (NO_x) were compared with those of gasoline fuel with various excess air factors. The results showed that the peak combustion pressure and ROHR of bio-ethanol blends were slightly higher and were increased as bio-ethanol blending ratio is increased. Brake specific fuel consumption increased for a higher bio-ethanol blending ratio. The exhaust emissions decreased as the bio-ethanol blending ratio increased under all experimental conditions. The exhaust emissions of bio-ethanol fuels were lower than those of gasoline.

- 기호설명 -

LHV : 저위발열량(low heating value, MJ/kg)

SI : 불꽃점화(spark ignition)

CA : 크랭크 각도(crank angle, degree)

BTDC : before TDC(degree)

WOT : 전부하(wide open throttle)

MBT : 최대 제동토크(maximum brake torque, kg · m)

† Corresponding Author, suhanpark@jnu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

- ROHR : 열발생률(rate of heat release, J/degree)
 HC : 탄화수소(hydrocarbon, ppm)
 CO : 일산화탄소(carbon monoxide, %)
 NO_x : 질소산화물(nitrogen oxides, ppm)
 λ : 공기 과잉률(excess air factor)

1. 서 론

최근 환경관련 규제 강화, 석유자원 고갈, 유가 불안정 등의 변화 속에서 자동차 업계는 미래 경쟁력 확보를 위한 다양한 대응방안을 마련하고 있다. 그 중 가솔린 및 디젤 엔진을 장착한 내연기관으로부터 발생하는 배기가스 및 온실가스 등의 환경문제에 대응하고 자원고갈에 대비하기 위해 대체 에너지자원 개발과 사용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻³⁾

자동차에 적용하기 위해 연구 중인 대체연료로는 바이오디젤, 바이오에탄올, 바이오부탄올, 디메틸에테르(dimethyl-ether, DME), 수소, 천연가스 등 다양한 형태가 있으며, 각각 연료의 특성에 따라 압축착화기관 및 불꽃점화기관에 적용하고 있다. 다양한 대체연료 중 불꽃점화기관인 가솔린기관에 적용할 수 있는 바이오에탄올(bio-ethanol)은 밀, 옥수수, 사탕수수와 같은 바이오매스뿐만 아니라 폐기물에서도 제조 가능한 재생 가능한 에너지(renewable energy)이며, 최소한의 엔진 하드웨어 변형으로 사용이 가능하다. 바이오에탄올 내 약 35% wt.의 산소를 포함하고 있어 완전연소를 통한 유해 배출물질을 저감할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 바이오에탄올은 가솔린에 비해 높은 옥탄가(octane number)를 갖고 있어 안티노크성(anti-knock property)이 우수하여 가솔린 기관에 적용할 경우 압축비 및 점화시기 조절을 통한 열효율 향상을 기대할 수 있다. 이와 함께 바이오에탄올은 가솔린 대비 높은 증발잠열로 인해 흡입과정과 압축과정 중 흡입공기 및 연소실의 냉각 효과를 얻을 수 있어 체적효율 향상과 엔진 성능 향상 등의 장점을 가지고 있다.⁽⁴⁻⁷⁾

그러나 에탄올 연료는 증발온도가 높아 시동 성능이 좋지 않고, 단위 질량당 저위발열량(low heating value, LHV)이 가솔린에 비해 약 40% 낮기 때문에 동일한 엔진 및 운전조건에서 가솔린으로 운전되는 엔진과 동일한 성능을 얻기 위해 더 많은 연료를 공급해 주어야 하며, 이로 인해

연료소비율이 증가하는 단점이 있다.^(8,9) 이러한 에탄올 연료의 단점을 해결하기 위해 연소실 내부로 연료를 직접 공급(분사)하는 연료분사시스템을 적용하여 연료의 증발특성을 높이고, 연료소비율을 고려한 희박연소를 적용하는 것이 새로운 해결책으로 주목받고 있다. 희박연소 적용 시 풍부한 흡입공기로 인해 연소성능이 향상되며, 공급되는 연료의 감소로 불완전 연소에 의한 유해 배기가스를 저감할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 직접분사식 불꽃점화기관에 바이오에탄올-가솔린 혼합연료를 적용하여 공기 과잉률(excess air factor) 및 혼합비율 변화 등 다양한 엔진 운전조건에서 최적의 연소 및 배기특성을 실험적으로 규명하는 것으로 목적으로 한다. 이를 위해 네 가지 비율의 바이오에탄올-가솔린 혼합연료를 만들어 혼합비율에 따른 연소특성, 희박연소특성 및 배기특성을 분석하였으며 이를 통해 각 성능 특성별 최적의 바이오에탄올-가솔린 혼합비율 및 공기 과잉률의 영향을 실험적으로 규명하고자 한다. 또한 혼합연료는 100% 가솔린 및 바이오에탄올 실험결과와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 주요장비는 실험엔진, 엔진 제어시스템, 연소데이터 취득 및 배기배출물 측정시스템으로 구성되어 있으며, 실험장치도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험용 엔진은 압축비 11:1, 배기량 1,591cm³인 직렬 4기통 SI(Spark Ignition) 엔진을 사용하였으며, 주요 엔진제원은 Table 1에 나타내었다. 실험엔진의 운전 조건인 회전속도 및 엔진부하를 제어하고 제동토크(brake torque) 등을 측정하기 위해 150kW급 수냉식 와전류식 전기동력계(EC dynamometer)를 사용하였다.

엔진제어를 위하여 범용 ECU(engine control unit, EMS-4, AEM)를 사용하였으며, 배기관에 장착된 광대역 램다센서(LSU4, Bosch)를 ECU와 연동시켜 feed-back control 방식인 closed-loop lambda control system을 이용하여 실시간 연료분사량 및 공연비를 제어하였다. 실험 엔진의 1번 실린더에 점화플러그 일체형 피에조 압전센서(6052B, Kistler)를 장착하고 Labview 소프트웨어와 연소압력데이터취득 시스템(SC-2345, National Instrument)을 사용하여 연소압력, 흡입공기유량,

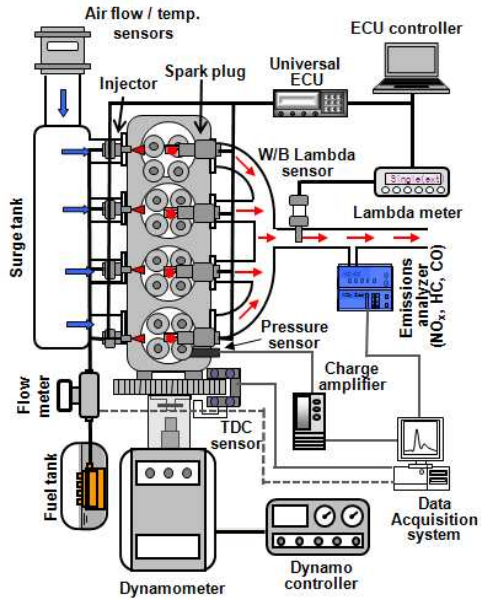


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

흡기온도, 배기가스온도 및 연료 유량 등의 측정값을 실시간으로 취득하였고, 측정된 신호값으로부터 연소압력 및 열발생률 및 연료소비율 등을 분석하였다. 실험엔진의 안정된 운전을 확인하기 위하여 윤활유 온도 및 압력, 냉각수 온도, 배기가스 온도 등을 실시간으로 관찰하였으며 배기배출물 특성 분석을 위하여 배기후처리장치인 촉매를 제거하였다. 배기가스 분석기(MEXA-551JK, Horiba)를 사용하여 CO, HC, NO_x 등 배기배출물 특성을 측정, 분석하였으며, 실험장치의 정확도 및 측정범위는 Table 2에 나타내었다.

2.2 실험방법 및 조건

본 연구에 적용한 자세한 실험조건은 Table 3와 같으며, 실험에 사용된 연료는 바이오에탄올의 혼합비율에 따른 영향을 살펴보기 위하여 총 6 종류의 연료를 사용하였으며, 바이오에탄올 혼합비율에 따라 E100, E80, E60, E40, E20으로 표기하였으며, 비교연료인 가솔린은 G100으로 표기하였다. E80은 80% 바이오에탄올과 20% 가솔린을 부피비로 혼합한 것을 의미한다. 실험에 사용된 바이오에탄올과 가솔린의 물성치는 Table 4에 나타내었다. 한편, 공연비 변화에 따른 특성을 파악하기 위하여 농후한 영역에서 희박한 조건까지 공기 과잉률(λ , excess air factor)을 1.2에서 0.8까지 0.2 간격으로 연료분사시간 조절을 통해 연소실로 공급되는 연료량을 조절하였다.

Table 1 Specifications of test engine

Description		Specifications
Engine type		4 cylinders, DOHC SI engine
Bore (mm) × Stroke (mm)		77.0 × 85.44
Displacement volume (cc)		1,591
Compression ratio		11.0
Ignition sequence		1-3-4-2
Fuel injection system		Direct injection
Intake valve	open (CA)	ATDC 8° – BTDC 42°
	close (CA)	ABDC 69° – ABDC 19°
Exhaust valve	open (CA)	BBDC 50° – BBDC 10°
	close (CA)	ATDC 5° – ATDC 45°
Ignition system		DLI (Distributor less ignition)
Maximum power		87.5kW at 6,300rpm
Maximum torque		17.0kg·m at 4,850rpm

Table 2 Specifications of the exhaust emission analyzer

Item	Specification
Principle of measurement	CO, HC: non-dispersive infrared rays NO _x : chemical method (ECS sensor)
Measuring range	HC: 0-10,000m vol. CO: 0-10 vol. % NO _x : 0-4,000 ppm
Measuring accuracy	HC: ± 12ppm vol. CO: ±0.06 vol. % NO _x : less than ±1.0%
Response	90% response within 10 sec

Table 3 Detailed experimental test conditions

Item	Test condition
Test fuel	Gasoline, Ethanol, Blended fuel
Blending ratio	G100, E20, E40, E60, E80, E100 (based on fuel volume)
Excess air ratio (λ)	0.8, 1.0, 1.2
Engine speed (rpm)	4,850
Engine Load (TP, %)	100
Ignition timing (°CA, BTDC)	0 – 50, MBT timing
Injection timing (°CA, BTDC)	25
Intake air temperature (°C)	35
Coolants temperature (°C)	75

실험에 앞서 각 연료들의 최대 진각 점화시기 MBT(Maximum Brake Torque) 시기(timing)를 측정하였으며 일정한 엔진 회전 속도(4,200rpm)에서 스로틀 밸브를 완전히 개방한 전부하(WOT, wide open throttle) 상태에서 실험을 진행하였다. 또한 실험 전 일정기간의 엔진운전을 통하여 안정된 상태를 유지하였다.

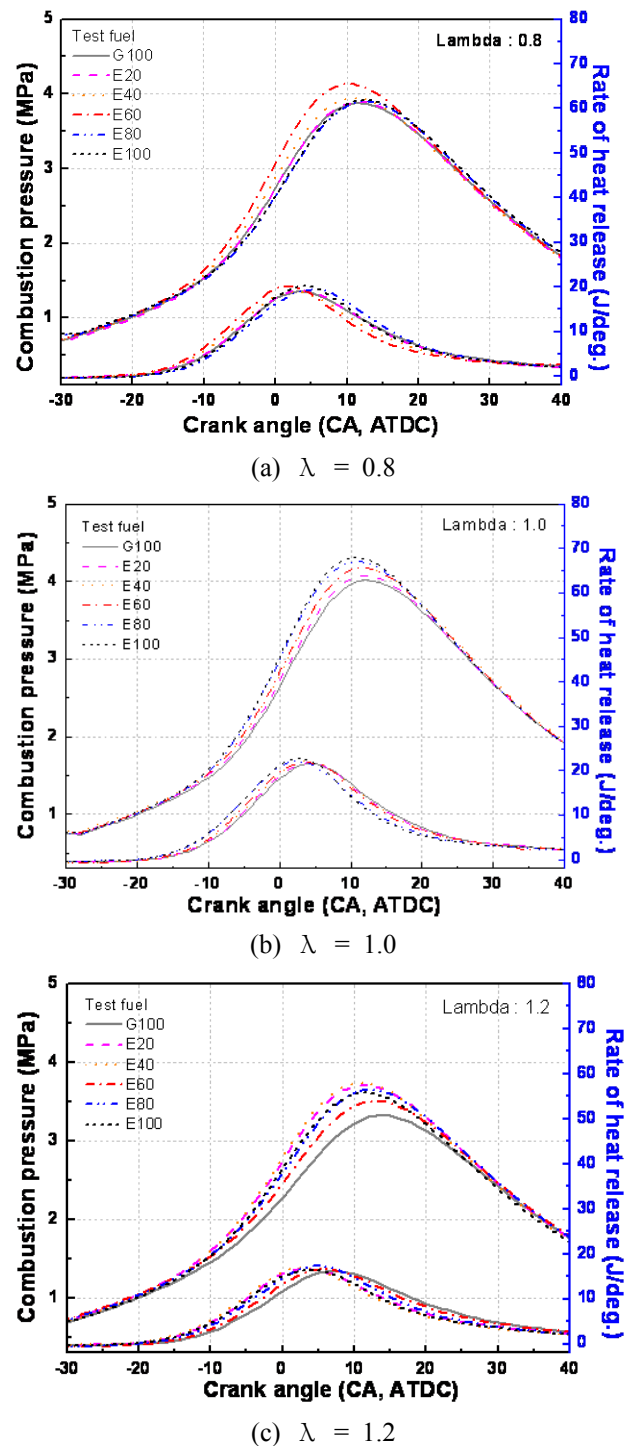
Table 4 Physical and chemical properties of bio-ethanol and gasoline

Fuel Property	Bioethanol	Gasoline
Formula	C ₂ H ₅ OH	C _n H _{1.87n}
Molecular weight	46.07	114.15
Composition (weight %)		
Carbon	52.2	85-88
Hydrogen	13.1	12-15
Oxygen	34.7	0
Sulfur	-	-
Density (kg/L, @15°C)	0.79	0.73
Boiling point (°C)	78.4	25-230
Viscosity (mPa · s @20°C)	1.2	0.626
Lower heating value (MJ/kg)	21.1	43.8
Latent heat of vaporization (kJ/kg)	854	289
Cetane number	8	-
Octane number	111	86-94
Auto ignition (°C)	420	257

3. 실험결과 및 고찰

3.1 바이오에탄올 혼합물 및 공기 과잉률 변화에 따른 연소 특성

Fig. 2(a)~(c)는 엔진회전속도 4,850rpm, 고부하 조건(WOT, 100%)에서 공기 과잉률 변화($\lambda=0.8, 1.0, 1.2$)에 따라 측정된 순수 가솔린(G100)과 바이오에탄올(E100) 및 혼합연료(E20 ~ E80)의 연소실 내 압력과 그에 따른 열발생률(ROHR, rate of heat release)을 나타낸 것이다. 먼저 공기 과잉률 변화에 따른 연소실 압력을 살펴보면 모든 실험 연료들이 공기 과잉률 1.0인 이론공연비 영역에서 최대연소압력 및 열발생률 특성을 나타내었고, 바이오에탄올 및 혼합연료의 연소압력이 가솔린에 비해 다소 높은 것을 확인할 수 있다. 이것은 바이오에탄올의 높은 옥탄가로 인한 MBT timing의 진각이 한 원인이라고 할 수 있다. 또한 바이오에탄올은 증발잠열이 높기 때문에 흡입/압축 과정에서 냉각효과를 유발하여 체적효율을 향상시킨다. 따라서 흡입되는 공기유량이 증가하여 바이오에탄올 및 혼합연료의 연소압력이 가솔린 단일 연소압력 보다 상승한 것으로 판단된다.⁽¹²⁾ 또한 가솔린 연료의 경우 이론공연비를 기준으로 농후한 영역과 희박한 영역에서 공연비 변화에 따라 연소압력의 급격한 변동을 관찰할 수 있었으나 바이오에탄올의 경우 동일한 영역에서 연소압력의 증감 폭이 작아 가솔린 적용시 보다 안정

**Fig. 2** Effect of the excess air factor and bioethanol-gasoline blended fuel on the combustion characteristics

된 연소결과를 나타내었다.

Fig. 2(c)의 희박한 조건에서도 바이오에탄올 및 혼합연료의 연소성능이 우수한 결과를 나타냈다. 바이오에탄올의 낮은 발열량으로 인해 가솔린과 동일한 엔진성능을 위해 연료공급량(연료

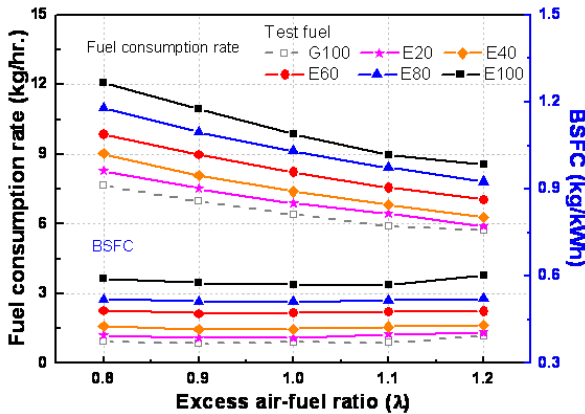
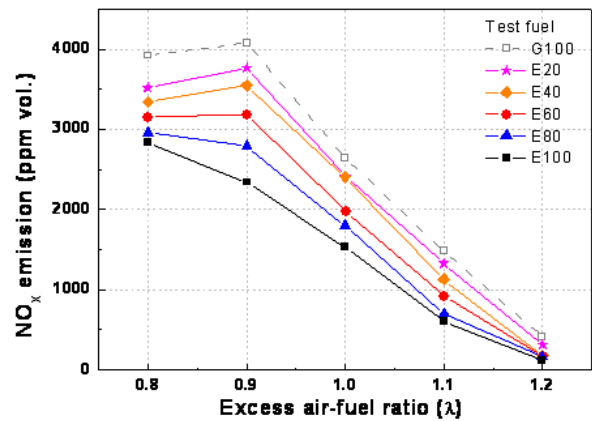


Fig. 3 Effect of the excess air factor and bioethanol-gasoline blended fuel on the fuel consumption characteristics

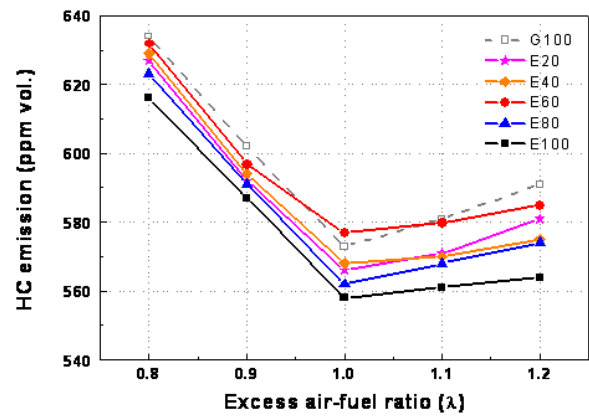
분사시기)을 증가시키고 이에 따른 바이오에탄올 연료 내 포함된 산소량이 증가되어 실제 공기 과잉률은 더욱 희박한 조건이 형성된다. 이로 인해 연소가 제대로 이루어지지 않는 실화(mis-fire)나 불완전연소 등의 영향을 바이오에탄올 연소가 가솔린에 비하여 적게 받으며 연소성능이 우수한 것으로 분석할 수 있다.

Fig. 3은 공기 과잉률과 바이오에탄올 혼합비율에 따른 바이오에탄올-가솔린 혼합연료의 연료소비율과 제동연료소비율(BSFC, brake specific fuel consumption)을 나타낸 결과이다. 공기 과잉률(λ)이 농후한 영역에서 희박한 영역으로 갈수록($\lambda=0.8 \rightarrow \lambda=1.2$). 바이오에탄올-가솔린 혼합연료의 연료소비율은 감소하는 경향을 나타내지만 이론공연비($\lambda=1.0$) 기준에서 희박한 조건에서는 제동연료소비율(BSFC)은 소폭 증가하는 결과를 확인할 수 있으며, 바이오에탄올 혼합량이 증가할수록 에너지 소비는 증가하였다. 이러한 결과는 혼합기가 희박해짐에 따라 연료 공급량이 감소하여 연료소비율이 감소하지만, $\lambda=1.2$ 이상의 희박영역에서는 연료 부족으로 인한 부분 연소 및 불완전연소 등으로 인해 출력 저하가 발생하기 때문에 제동연료소비율이 증가하는 것으로 판단된다.

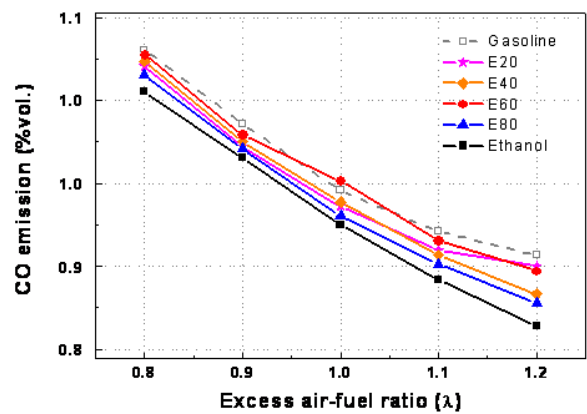
이는 에탄올 연료의 단점인 단위 질량당 낮은 발열량(가솔린의 60%)으로 인하여 에탄올의 연료공급량이 다소 증가하였기 때문으로 판단된다. 그러나 $\lambda=1.2$ 의 희박연소 조건에서 E100과 G100의 제동연료소비율을 비교해 보면 그 차이가 약 25% 미만으로 점화시기 조절(진각)과 에탄올 연료의 혼합비 냉각효과로 인하여 에너지 소비를



(a) NO_x emission



(b) HC emission



(c) CO emission

Fig. 4 Effect of the excess air factor and bioethanol-gasoline blended fuel on the exhaust emission characteristics

감소시키는 결과를 얻었다.^(11,12)

3.2 바이오에탄올 혼합을 및 공기 과잉률 변화에 따른 배기배출물 특성

Fig. 4(a)~(c)는 공기 과잉률 변화와 바이오에탄

올 혼합율을 변화에 따른 NO_x, HC 및 CO 등의 유해 배기배출물 특성을 각각 나타낸 결과이다. Fig. 4(a)의 NO_x 배출물은 바이오에탄올 및 혼합연료 연소의 배출량이 공기 과잉률 전 영역에서 가솔린이 증가할수록 감소하는 결과를 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 바이오에탄올의 높은 증발 잠열로 인한 냉각효과로 흡입행정 말기 및 압축행정에서 연소실 내부의 온도가 감소되고 폭발행정 중 열발생이 가솔린 연료에 비하여 적기 때문에 NO_x의 발생량이 가솔린 연료에 비하여 낮은 것으로 판단된다.⁽¹⁰⁾ 또한 공기 과잉률이 희박한 영역으로 갈수록 희박연소로 연소온도가 감소하여 NO_x 배출이 줄어드는 결과를 나타내었다.

Fig. 4(b)의 HC 배출의 경우 모든 실험연료가 이론 공연비($\lambda=1.0$) 조건에서 배출량이 최저임을 알 수 있다. 이는 이론공연비 조건에서 연소생성물의 산화를 촉진하여 HC의 배출량이 감소한 것으로 판단된다. 농후한 영역($\lambda < 0.9$)과 희박영역($\lambda > 1.1$)에서 모든 연료의 HC 배출량이 다소 증가하고 있으며 이는 연료 분사량이 실제 연소에 필요한 공급량 보다 많거나 부족하기 때문에 연소에 필요한 산소는 결과적으로 감소되거나 증가되어 불완전연소로 더욱 미연소가스 발생이 증가한 것이다. 바이오에탄올 연료의 혼합율이 증가할수록 공기 과잉률 전 영역에서 HC 배출은 감소하는 특성을 나타내고 있으며 이는 바이오에탄올 연료 내 포함된 산소량의 증가로 인한 보다 안정되고, 실화 또는 부분연소 등이 적게 발생하며 연소실 내 직접 연료를 분사함으로 인하여 연료의 증발특성이 향상된 것으로 판단된다.

CO 배출량의 경우 농후한 영역에서 희박한 영역으로 갈수록($\lambda=0.8 \rightarrow \lambda=1.2$) 배출량이 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 바이오에탄올 혼합연료의 CO 배출량이 가솔린에 비해 감소하는 결과를 나타냈으며 혼합율에 비례하여 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 바이오에탄올의 함산소 특성으로 인해 CO의 산화반응을 촉진했기 때문으로 판단된다.^(10,11)

4. 결 론

바이오에탄올을 적용한 SI 엔진에서 바이오에탄올-가솔린 혼합비율과 공기 과잉률 변화에 따른 연소 및 배기특성을 실험적으로 연구한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 공기 과잉률 변화에 따른 연소실 압력을 살

펴보면 모든 실험연료들이 공기 과잉률(λ) 1.0인 이론공연비 영역에서 최대연소압력 및 열발생률 특성을 나타내었고, 바이오에탄올 및 혼합연료의 연소압력이 가솔린에 비하여 높은 다소 증가하는 결과를 나타내었다.

(2) 가솔린 연료의 경우 이론공연비를 기준으로 농후한 영역과 희박한 영역에서 공연비 변화에 따라 연소압력의 급격한 변동이 나타났으나, 바이오에탄올 연료의 경우 동일한 영역에서 연소압력의 증감폭이 가솔린에 비해 작아 안정된 연소 결과를 나타내었다.

(3) 희박한 조건($\lambda=1.2$)에서 바이오에탄올 연료의 경우 연소가 제대로 이루어지지 않는 실화(mis-fire)나 불완전연소 등의 영향을 바이오에탄올 연소가 가솔린에 비해 적게 받으며 연소성능이 우수한 것으로 분석할 수 있다.

(4) 공기 과잉률(λ)이 농후한 영역에서 희박한 영역으로 갈수록 바이오에탄올-가솔린 혼합연료의 연료소비율은 하락하는 경향을 나타냈지만, 이론공연비 기준에서 희박한 조건에서는 제동연료소비율(BSFC)은 소폭 증가하는 결과를 나타내었다.

(5) NO_x 배출물은 바이오에탄올 및 혼합연료 연소의 배출량이 공기 과잉률 전 영역에서 가솔린의 배출량에 비하여 작으며, 바이오에탄올의 높은 증발잠열로 인한 냉각효과와 흡입행정 말기 및 압축행정에서 연소실 내부의 온도감소로 폭발행정 중 열발생이 가솔린 연료에 비하여 적기 때문에 바이오에탄올 혼합율이 증가할수록 감소하는 결과를 확인할 수 있었다.

(6) HC 배출물의 경우 모든 실험연료가 이론 공연비 조건에서 배출량이 가장 낮게 나타났으며, 바이오에탄올 혼합율이 증가할수록 공기 과잉률 전 영역에서 감소하는 특성을 나타내었다. 또한 CO 배출량의 경우 농후한 영역에서 희박한 영역으로 갈수록 배출량이 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2014R1A1A2057805).

참고문헌 (References)

(1) Park, C. W., Kim, C. G., Choi, Y., Oh, S. M.

- and Lim, G. H., 2010, "The Performance and Emission Characteristics on Operating Condition for the SI Engine Fuel with Gasoline-ethanol and Hydrogen Enriched Gas," *Trans. KSAE*, Vol. 18, No. 1, pp. 23~30.
- (2) Jeuland, N., Montagne, X. and Gautrot, X., 2004, "Potentiality of Ethanol as a Fuel for Dedicated Engine", *Oil&Gas Science and Technology*, Vol. 59, No. 6, pp. 559~570.
- (3) Oh, H., Lee, M., Park, J. and B, C., 2013, "Effect of Injection Pressure and Injection Timing on Spray and Flame Characteristics of Spray-guided Direct-injection Spark-ignition Engine under Lean Stratified Combustion Operation", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B.*, Vol. 37, No. 3, pp. 221~228.
- (4) Turner, J. W. G., Pearson, R. J. Holland, B. and Peck, R., 2007, "Alcohol-based Fuels in High Performance Engines," *SAE technical paper*, SAE 2007-01-0056.
- (5) Hsieh, W. D., Chen, R. H., Wu, T. L. and Lin, T. H., 2002, "Engine Performance and Pollutant Emission of an SI Engine Using Ethanol-gasoline Blended Fuel," *Atmospheric Environment*, Vol. 36, pp. 403~410.
- (6) Al-Hassan, M., 2004, "Effect of Ethanol- unleaded Gasoline Blends on Engine Performance and Exhaust Emission," *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, pp. 1547~1561.
- (7) Kumar, C. R. and Nagrajan, G., 2012, "Performance and Emission Characteristics of a Low Heat Rejection Spark Ignited Engine Fuelled with E20", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 4, pp. 1241~1250.
- (8) Streva, E. R., Pereira, L. V. M., Sodre, J. R. and Pasa, V. M. D., 2003, "Gasoline-ethanol Blend aging Effect on Engine Performance and Exhaust Emissions," *SAE technical paper*, SAE 2003-01-3184.
- (9) Li, W., Wang, Y., Zhou, L. and Su, L., 2007, "Study on Improvement of Fuel Economy and Reduction in Emissions for Stoichiometric Gasoline Engines," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 2919~2923.
- (10) Yoon, S. H. and Lee, C. S., 2011, "Lean Combustion and Emission Characteristics of Bioethanol and its Blends in a Spark Ignition (SI) Engine," *Energy & Fuels*, Vol. 25, pp. 3484~3492.
- (11) Yoon, S. H. and Lee, C. S., 2012, "Effect of Undiluted Bioethanol on Combustion and Emissions Reduction in a SI Engine at Various Charge Air Conditions," *Fuel*, Vol. 97, pp. 887~890.
- (12) Yoon, S. H., Ha, S. Y., Roh, H. G. and Lee, C. S., 2009, "Effect of Bioethanol as an Alternative Fuel on the Emission Reduction Characteristics and Combustion Stability in a Spark Ignition Engine," *Journal of Automobile Engineering*, Vol. 223, pp. 941~951.