

공연비 변화가 바이오에탄올 연료 스파크 점화기관의 연소 및 배출물 특성에 미치는 영향

김 대 성¹⁾ · 윤 승 현¹⁾ · 이 창 식^{*2)}

한양대학교 대학원¹⁾ · 한양대학교 기계공학부²⁾

Effect of Air-fuel Ratio on Combustion and Emission Characteristics in a Spark Ignition Engine Fueled with Bio-ethanol

Daesung Kim¹⁾ · Seung Hyun Yoon¹⁾ · Chang Sik Lee^{*2)}

¹⁾Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 3 February 2009 / Accepted 30 June 2009)

Abstract : The purpose of this paper is to investigate the effect of air-fuel ratio on the combustion and emissions characteristics of spark ignition (SI) gasoline engine fueled with bio-ethanol. A 1.6L SI engine with 4 cylinders was tested on EC dynamometer. In addition, lambda sensor and lambda meter were connected with universal ECU to control the lambda value which is varied from 0.7 to 1.3. The engine performance and combustion characteristics of bio-ethanol fuel were compared to those obtained by pure gasoline. Furthermore, the exhaust emissions such as carbon monoxide (CO), unburned hydrocarbon (HC), oxides of nitrogen (NO_x) and carbon dioxide (CO₂) were measured by emission analyzers. The results showed that the brake torque and cylinder pressure of bio-ethanol fuel were slightly higher than those of gasoline fuel. Brake specific fuel consumption (BSFC) of bio-ethanol was increased while brake specific energy consumption (BSEC) was decreased. The exhaust emissions of bio-ethanol fuel were lower than those of gasoline fuel under overall experimental conditions. However, the specific emission characteristics of the engine with bio-ethanol fuel were influenced by air-fuel ratio.

Key words : Air-fuel ratio(공연비), Combustion characteristics(연소특성), Emission characteristics(배기특성), Bio-ethanol(바이오에탄올), Spark ignition engine(스파크 점화 기관)

1. 서론

자동차로부터 나오는 유해 배출 가스의 저감과 온실가스 배출저감 등의 환경문제에 대응하고, 화석 연료의 고갈에 대응하기 위하여 최근 대체 에너지에 대한 연구가 여러 연구자들에 의하여 활발하게 진행되고 있다.¹⁻³⁾ 대체 연료 중에서 바이오에탄올은 밀, 옥수수, 사탕수수 등 식물에서 추출할 수

있는 재생 가능한 에너지이며, 분자 구조에 산소를 함유하고 있는 함산소 연료이기에 연소과정에서 유해 물질의 생성을 저감시킬 수 있는 특성을 가지고 있는 친환경 연료이다.⁴⁾ 또한 바이오에탄올은 옥탄가가 높아 안티노크성이 우수하여 기존의 스파크 점화 기관에 적용할 경우, 압축비를 증가시켜 열효율을 높일 수 있고, 높은 증발 잠열로 인하여 흡입과정 중, 흡입 공기의 냉각 효과를 가져와 엔진의 체적효율을 향상시킬 수 있다.^{5,6)}

*Corresponding author, E-mail: cslee@hanyang.ac.kr

그러나 바이오에탄올은 가솔린 보다 발열량이 낮기 때문에 가솔린 연료를 사용하였을 때와 동일한 성능을 유지하려면 연료 분사량을 증가시켜야 한다. 그리고 공연비의 변화는 공기와 연료의 혼합 상태를 결정하여 연소 특성에 영향을 미치게 되고, 이러한 연소 특성의 변화는 배기 특성에도 변화를 주게 된다.⁷⁻⁹⁾

본 연구에서는 스파크 점화 기관에 바이오에탄올 연료를 적용하였을 경우, 공연비 변화에 따른 엔진 성능 특성과 연소 및 배기 특성을 실험적으로 규명하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 바이오에탄올 연료 스파크 점화 기관의 공연비 및 엔진 운전 조건에 따른 엔진 성능 특성과 연소 및 배기 특성을 가솔린 연료를 사용하였을 때의 결과와 비교, 분석하였고, 이를 통해 대체 연료로서 바이오에탄올의 특성을 실험적으로 규명하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 실험 장치는 크게 실험 엔진, 엔진 전자 제어 시스템, 데이터 취득 시스템 그리고 배기 배출물 측정 시스템의 4 부분으로 구성하였으며, 실험 장치 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

실험 엔진은 압축비 10.5이고 배기량이 1591 cm³인 4기통 SI 엔진을 사용하였고, 그 주요 제원은 Table 1과 같다. 실험 엔진의 회전속도 및 부하량을 제어하고, 제동 토크 등을 측정하기 위하여 75 kW 와전류 전기 동력계(EC dynamometer)를 사용하였고, 정확한 상사점(TDC)를 검출하기 위하여 크랭크 축에 로터리 엔코더를 장착하였다. 또한 실험 엔진에 점화 플러그 일체형 압력 센서(6052B, Kistler)를 장착하여 연소 압력 파형을 취득하였고 이를 통해 연소 압력 및 열발생을 등을 계산하여 연소 특성을 파악하였다.

엔진 전자 제어 시스템에서는 점화 코일, 인젝터, 아이들 스피드 밸브 등을 제어하기 위하여 범용 ECU를 장착하였고, 배기 매니폴드에 장착된 램다 센서(LSU4, Bosch)와 램다미터(PLM, MOTEC)를 범용 ECU와 연동시켜 연료 분사 기간을 피드백 제어하는 방식으로 공연비를 제어 및 변화시켰다.

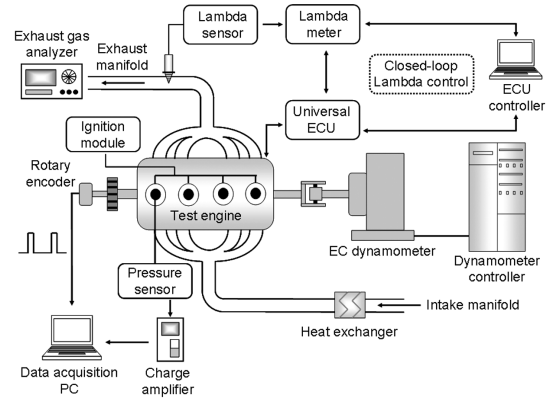


Fig. 1 Schematic diagrams of experimental apparatus

Table 1 Specifications of test engine

Descriptions		Specifications
Number of cylinders		4
Bore (mm) × Stroke (mm)		75 × 85.44
Displacement volume (cm ³)		1591
Compression ratio		10.5
Ignition / Injection sequence		1 - 3 - 4 - 2
Intake valve	open (°CA ATDC)	10
	close (°CA ABDC)	63
Exhaust valve	open (°CA BBDC)	40
	close (°CA ATDC)	3
Ignition system		DLI (Distributor less ignition)
Maximum power		89 kW at 6200 rpm
Maximum torque		15.6 kg · m at 4200 rpm

데이터 취득 시스템에서는 Labview 소프트웨어와 data acquisition board(SC-2345, National Instrument)를 사용하여 압력신호 등의 실험 데이터를 실시간으로 수집하였다.

배기 측정 시스템에서는 배기가스 분석기(MEXA-551JK, Horiba)를 사용하여 CO, HC, NO_x 그리고 CO₂ 등의 배기 배출물을 측정하였고, 배기가스는 삼원 촉매의 영향을 배제하기 위하여 삼원촉매 전단부에서 추출하였다. 또한, 실험 연료로는 가솔린과 바이오에탄올을 사용하였으며, 두 연료의 물성을 Table 2에 나타내었다.

2.2 실험 방법

공연비 변화에 따른 바이오에탄올 연료의 연소

Table 2 Properties of test fuels

Characteristic	Gasoline	Bio-ethanol
Chemical formula	C _n H _{1.87n}	C ₂ H ₅ OH
Molecular weight (kg/kmol)	114.15	46.07
Oxygen (% wt)	0	35
Octane number	86-94	98-100
Density (kg/m ³ at 20°C)	732	792
Latent heat of vaporization (kJ/kg)	289	854
Auto-ignition temperature (°C)	257	423
Low heating value (MJ/kg)	44	27
A/F ratio (by volume)	14.7	9.00

및 배기 특성을 살펴보기 위하여 일정한 엔진회전 속도(RPM, revolution per minute)와 엔진부하 조건 하에서, 점화시기 및 공연비 등을 변화시켜 다양한 엔진 운전 조건을 설정하였으며, 본 연구에 적용한 실험 조건을 Table 3에 나타내었다. 엔진의 회전속도는 동력계를 사용하여 2500 rpm으로 일정하게 제어 하였다. 엔진회전속도가 제어된 상태에서 스로틀 밸브 개도량을 조절하여 엔진에 부하를 가하였고, 스로틀 밸브를 완전하게 개방한 전부하(WOT, wide open throttle) 상태에서 실험을 진행하였다. 실험 범위 전 영역에서 흡입공기 온도와 냉각수 온도는 각각 40°C와 70°C로 일정하게 유지하였고, 연료 분사 시기는 BTDC 400°로 고정하였다.

기초 실험을 통해 각각의 연료와 공연비에 대하여 점화시기를 TDC에서 BTDC 40°까지 5° 간격으로 변화시키며 제동토크를 측정하였고, 최대토크를 나타내는 최소 진각 점화시기를 MBT 타이밍(minimum spark advance for best torque)으로 선택하여, 본 실험에서 모든 점화는 MBT 타이밍에서 이루어지도록 하였다. 공기과잉률(excess air ratio, λ)은 연료분사 기간 조절을 통해 0.7 ~ 1.3 까지 변화시켰다.

Table 3 Experimental conditions

Item	Conditions
Test fuel	Gasoline, Bio-ethanol
Excess air ratio (λ)	0.7 ~ 1.3
Engine speed (rpm)	2500
Engine load (% ,TP)	100 (WOT)
Ignition timing	MBT timing
Intake air temperature (°C)	40
Coolant temperature (°C)	70
Injection timing (°CA BTDC)	400

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 공연비 변화에 따른 엔진 성능 특성

Fig. 2는 공기과잉률 변화에 따른 바이오에탄올 과 가솔린 연료의 제동토크 및 배기가스 온도를 나타낸 것이다. 엔진회전속도 2500 rpm에서 제동토크는 두 연료 모두 농후한 영역(λ<0.9)에서 높게 나타나는 경향을 보였지만, 더 이상 증가하지는 않았다. 이는 이론공연비 부근에서 열해리의 영향으로 λ=0.9 근방의 다소 농후한 영역에서 최대토크가 발생한 것으로 사료되며, 공기-연료 혼합 상태가 λ=0.9 보다 농후해지면 연소에 필요한 산소가 부족하여 제동토크가 더 이상 증가하지 않는 것으로 판단된다. 또한 전반적으로 바이오에탄올의 제동토크가 가솔린에 비하여 높은 것을 확인할 수 있는데, 이는 바이오에탄올이 가솔린에 비하여 증발잠열이 크기 때문에 흡입공기를 냉각시켜 체적효율을 증가시킨 결과로 판단된다. 또한 바이오에탄올은 분자구조에 산소를 포함하고 있는 함산소 연료이기 때문에 연소과정 중, 함산소 성분이 연소 반응을 더욱 활성화시키기 때문으로 판단된다.

배기 온도는 배기 매니폴드에 장착된 열전대를 이용하여 측정하였으며, 두 연료 모두 이론 공연비 영역(λ=1.0)에서 가장 높은 배기 온도를 나타내었고, 이론 공연비에서 멀어질수록 배기 온도가 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 전반적으로 바이오에탄올의 배기 온도가 가솔린에 비하여 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이는 바이오에탄올의 높은 증발

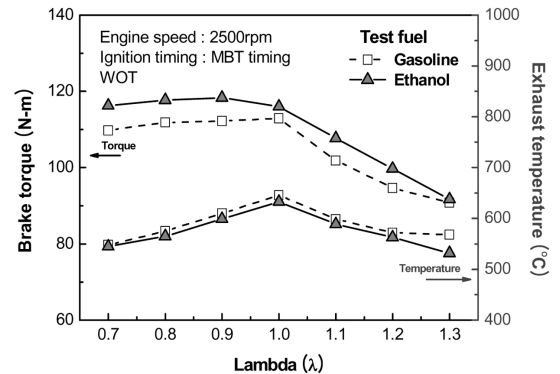


Fig. 2 Brake torque and exhaust temperature of gasoline and bio-ethanol at 2500 rpm

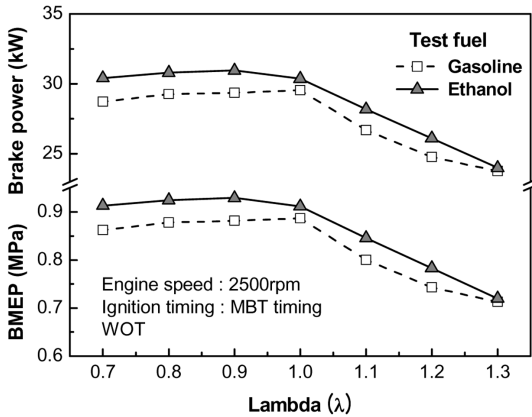


Fig. 3 BMEP and brake power of gasoline and bio-ethanol at 2500 rpm

잠열에 의한 혼합기의 냉각효과와 바이오에탄올의 낮은 단열화염온도가 복합적으로 영향을 미친 이유라 판단된다.

Fig. 3은 공기과잉률 변화에 따른 제동평균유효압력(BMEP, brake mean effective pressure)과 제동출력을 나타낸 것이다. 엔진회전속도 2500 rpm에서 BMEP는 두 연료 모두 공기과잉률 1을 기준으로 농후한 영역($\lambda < 0.9$)에서는 뚜렷한 증감을 보이지 않았으나, 희박한 영역($\lambda > 1.1$)에서는 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 제동출력에서도 동일하게 나타났고, 이를 통해 BMEP와 제동출력은 제동토크의 경향과 일치함을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 두 연료의 제동연료소비율(BSFC, brake specific fuel consumption) 및 제동에너지소비율(BSEC, brake specific energy consumption)을 비교하여 나타낸 것이다.

바이오에탄올 연료의 BSFC는 공기과잉률 전 영역에서 가솔린 연료에 비하여 높게 나타났다. 이는 바이오에탄올의 발열량이 약 27 MJ/kg으로 가솔린의 발열량 44 MJ/kg에 비하여 60% 수준이기 때문에 동일한 엔진 운전 조건에서 바이오에탄올의 연료 분사량이 가솔린에 비하여 증가하는 이유로 판단된다. 그러나 두 연료의 발열량을 고려하여 BSEC를 계산한 결과, 바이오에탄올의 BSEC가 가솔린에 비하여 낮은 것을 확인할 수 있었다. BSEC 결과를 통해 소비한 연료를 에너지로 변환하는 효율은 바이오에탄올 연료가 가솔린 연료에 비하여 우수함을

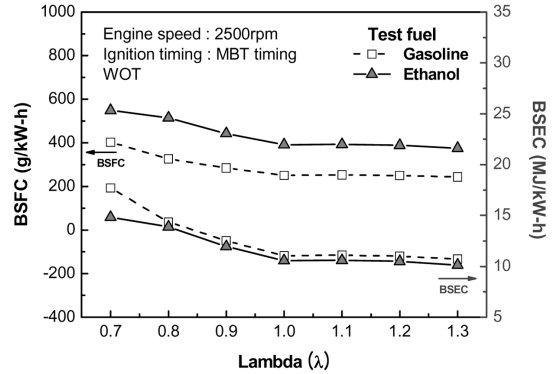


Fig. 4 BSFC and BSEC of gasoline and bio-ethanol at 2500 rpm

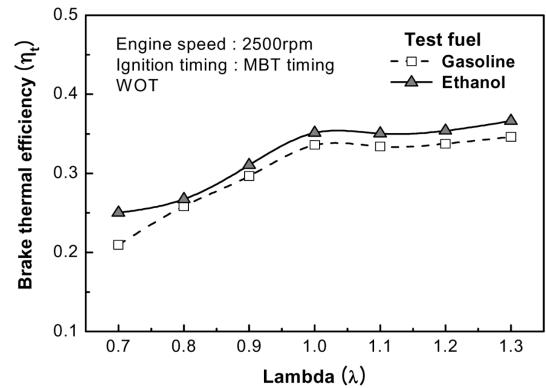


Fig. 5 Brake thermal efficiency of gasoline and bio-ethanol at 2500 rpm

알 수 있으며, 이는 Fig. 5에 나타낸 제동 열효율 그래프를 통해서도 확인할 수 있다.

3.2 공연비 변화에 따른 연소 특성

Fig. 6과 Fig. 7은 엔진회전속도 2500 rpm에서 취득한 가솔린 연료와 바이오에탄올 연료의 압력 파형과 그에 따른 열발생율(ROHR, rate of heat release)을 나타낸 것이다. 공기과잉률 변화에 따른 연소실 압력을 살펴보면 두 연료 모두 공기과잉률 0.8 근방의 농후한 영역에서 최대연소압력을 나타내었고, 바이오에탄올의 연소압력이 가솔린에 비하여 다소 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 바이오에탄올 연료의 경우 가솔린 연료보다 증발잠열이 크기 때문에 동일한 공기과잉률에서 가솔린 연료에 비하여 엔진의 체적효율이 향상되어 흡입공기량이 증가한 이유

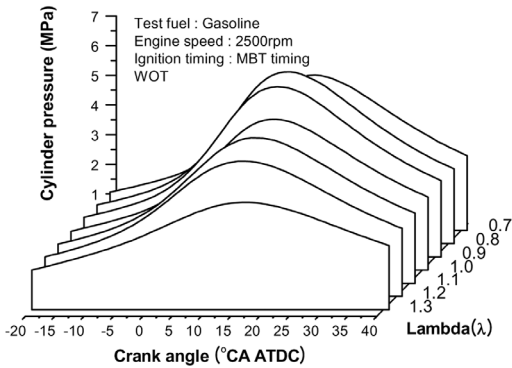


Fig. 6(a) Cylinder pressure of gasoline at 2500 rpm

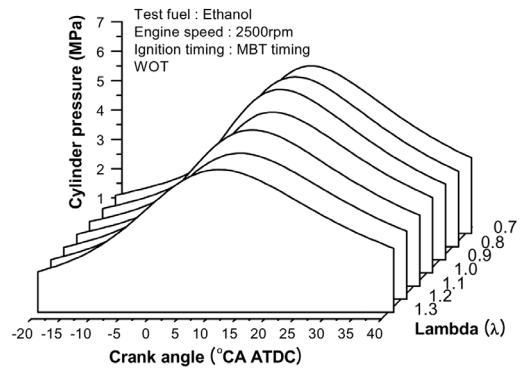


Fig. 7(a) Cylinder pressure of bio-ethanol at 2500 rpm

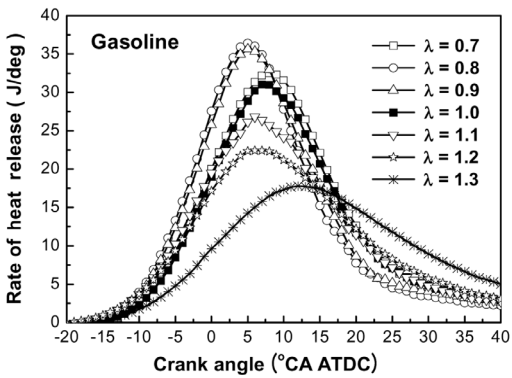


Fig. 6(b) ROHR of gasoline at 2500 rpm

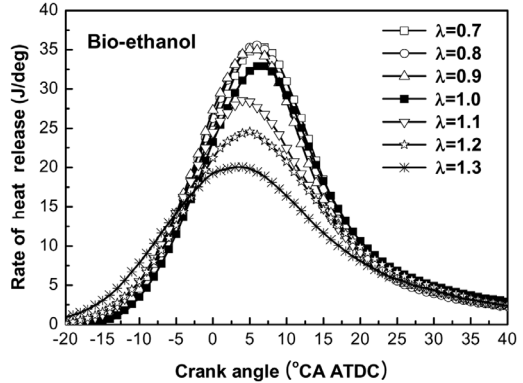


Fig. 7(b) ROHR of bio-ethanol at 2500 rpm

라 판단되며, 또한 가솔린에 비해 바이오에탄올의 옥탄가가 높아서 점화시기가 보다 진각되었기 때문에 바이오에탄올의 연소압력이 가솔린에 비하여 증가하였다고 판단된다. 또한 가솔린 연료의 경우 이론공연비를 기준으로 하여 농후한 영역과 희박한 영역에서 공연비 변화에 따라 연소압력의 급격한 변동이 나타났으나, 바이오에탄올 연료의 경우에는 동일한 영역에서 연소압력의 증감 폭이 가솔린에 비하여 적은 것을 확인할 수 있었다. 이는 바이오에탄올 연료의 경우, 농후한 영역에서는 높은 옥탄가로 인하여 노킹 등의 이상연소에 따른 영향을 가솔린에 비하여 적게 받은 이유라고 판단되며, 희박한 영역에서는 바이오에탄올의 낮은 발열량을 보상하기 위하여 연료분사기간이 증가되므로 연소가 제대로 이루어지지 않는 부분연소 등의 영향을 바이오에탄올 연료가 가솔린 연료에 비하여 적게 받은 이

유라 판단된다.

Fig. 8은 두 연료의 최대연소실압력에 대한 변동계수(COV,coefficient of variation)를 나타낸 것이다. 바이오에탄올 연료의 변동계수는 공기과잉률 전 영역에서 가솔린에 비하여 낮게 나타났으며, 증감폭 또한 적음을 확인할 수 있다. 특히 희박한 영역에서 COV가 급격하게 증가하는 이유는 연소실 압력특성과 연관시켜 판단하였을 때, 희박한 영역에서는 공기과잉에 따른 연소불균형으로 각 사이클의 변동폭이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 바이오에탄올 연료의 경우 공기과잉률 1.2 지점까지 변동계수가 10 이하로 나타났으며, 이를 통해 바이오에탄올 연료의 엔진 운전 안정성이 가솔린 연료에 비하여 보다 희박한 영역까지 확장되는 것을 확인할 수 있었다.

이상의 결과들을 통하여 공기과잉률 변화에 대한

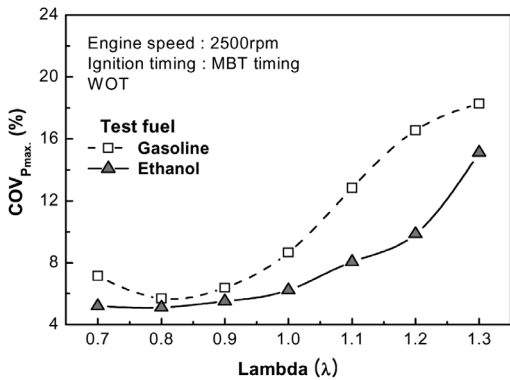


Fig. 8 COV of maximum pressure of gasoline and bio-ethanol at 2500 rpm

연소 안정성은 바이오에탄올 연료가 가솔린 연료에 비하여 우수하다고 판단할 수 있다.

3.3 공연비 변화에 따른 배기 특성

공기과잉률 변화에 따른 가솔린 연료와 바이오에탄올 연료의 배기 특성을 Fig. 9에 도시하였다.

CO의 경우 농후한 영역($\lambda < 0.9$)에서는 가솔린 연료의 배출량이 높았으나, 희박한 영역($\lambda > 1.1$)에서는 두 연료 모두 배출량이 0에 가까운 것을 확인할 수 있었다.

이는 농후한 영역에서는 산소 부족으로 인해 불완전 연소가 발생하여 CO의 배출량이 증가한 것으로 판단되며, 특히 농후한 영역에서 바이오에탄올의 CO 배출량이 가솔린에 비하여 적은 것은 바이오에탄올의 함산소 성분이 연소상태를 개선하기 때문으로 생각한다.

HC의 경우는 두 연료 모두 배기온도가 가장 높은 이론공연비 근방에서 배출량이 최저임을 알 수 있다. 이는 해당영역에서 배기온도의 상승이 연소생성물의 산화를 촉진하여 HC의 배출량이 감소하였다고 판단된다. 또한 농후한 영역에서 바이오에탄올 연료의 HC 배출량이 가솔린 연료에 비하여 증가하는 이유는 바이오에탄올 연료의 경우 분사량이 가솔린 연료의 분사량 보다 많기 때문에 연소에 필요한 산소는 상대적으로 감소되어 불완전 연소가 더욱 심화된 이유라 판단된다. 희박한 영역에서의 HC 배출량은 농후한 영역에서의 배출량과 반대의 양상을 관찰할 수 있다. 이는 바이오에탄올 연료의

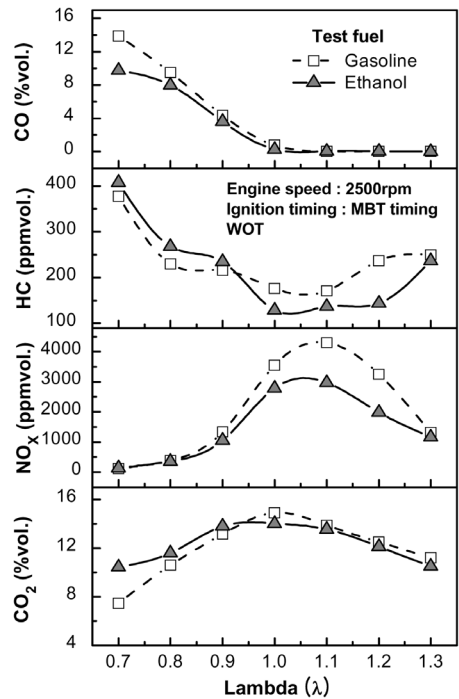


Fig. 9 Emission characteristics of gasoline and bio-ethanol at 2500 rpm

함산소 성분이 연소 상태를 개선하여 실화 또는 부분연소 등이 적게 발생한 이유라 판단된다.

NO_x의 경우 공기과잉률 전 영역에서 바이오에탄올의 배출량이 가솔린의 배출량에 비하여 적은 것을 확인할 수 있었다. 이는 바이오에탄올의 높은 증발잠열로 인해 흡입행정 말기에 실린더 내부의 온도가 감소되어 폭발행정 중의 급격한 열발생이 가솔린 연료에 비하여 적기 때문에 NO_x의 배출량이 가솔린 연료에 비하여 적은 것으로 판단된다.

CO₂의 경우 두 연료 모두 이론공연비 근방에서 그 배출량이 최대가 되는 것을 관찰할 수 있다. 이는 해당 영역에서 두 연료 모두 완전연소가 이루어진 이유라고 판단된다. 또한 이론공연비를 기준으로 농후한 영역과 희박한 영역에서는 배출량이 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 희박한 영역에서는 흡입 공기량의 증가에 따른 공기-연료 혼합기의 희석으로 인하여 CO₂의 배출량이 감소하였다고 판단되며 농후한 영역에서는 연소에 필요한 산소의 부족으로 인하여 탄소 분자 대부분이 CO로 배출되었기 때문이라 판단된다.

4. 결론

바이오에탄올과 가솔린을 연료로 사용한 스파크 점화기관에서 공연비 변화가 엔진성능과 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제동토크의 경우 실험을 수행한 전 공기과잉률 영역에서 바이오에탄올 연료가 가솔린 연료에 비해 높게 나타났다. 두 연료 모두 $\lambda=0.9$ 근방의 다소 농후한 영역에서 최대 제동토크를 나타내었고, 희박한 영역에서는 급격히 감소하였다. 제동평균유효압력 및 제동출력 또한 제동토크의 경향과 일치하였다.
- 2) 실험을 수행한 전 공기과잉률 영역에 걸쳐 바이오에탄올 연료의 제동연료소비율이 가솔린 연료에 비하여 높게 나타났지만, 발열량을 고려한 제동에너지소비율은 가솔린 연료에 비하여 낮았고, 제동 열효율 측면에서는 바이오에탄올 연료가 우수하였다.
- 3) 바이오에탄올 연료의 최대연소압력은 가솔린 연료에 비하여 평균 9% 높았고, 공기과잉률 변화에 대한 연소압력의 변동은 적은 특성을 나타내었다. 변동계수를 고려한 연소 안정성 측면에서도 바이오에탄올 연료가 가솔린 연료에 비하여 우수하였다.
- 4) 공기과잉률 1.1 근방의 희박한 영역에서 CO와 HC의 배출량은 최저가 되었으며, 바이오에탄올 연료의 경우 NO_x 배출량은 가솔린 연료에 비하여 최대 61% 저감되었다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR project(무·저공해 자동차사업단)와 두뇌한국21 사업의 지원과 2008년 정부재원으로 한국 학술진흥재단의 지원(KRF-2008-314-D00056)을 받아 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

References

- 1) D. Y. Lee, M. Y. Kim, S. Y. Ha, H. G. Roh and C. S. Lee, "Combustion and Emission Charac-

- teristics of a SI Engine Fueled with Ethanol-Gasoline Blended Fuel," Fall Conference Proceedings, KSAE, Vol.1, pp.428-433, 2007.
- 2) B. Y. Xu, L. Y. Qi, W. B. Zhang and S. L. Cai, "Fuel Properties and Emission Characteristics of Ethanol-Diesel Blended on Small Diesel Engine," Int. J. Automotive Technology, Vol.8, No.1, pp.9-18, 2007.
- 3) M. Al-Hassan, "Effect of Ethanol-Unleaded Gasoline Blends on Engine Performance and Exhaust Emission," Energy Conversion and Management, Vol.44, pp.1547-1561, 2004.
- 4) W.-D. Hsieh, R.-H. Chen, T.-L. Wu and T.-H. Lin, "Engine Performance and Pollutant Emission of an SI Engine Using Ethanol-Gasoline Blended Fuel," Atmospheric Environment, Vol.36, pp.403-410, 2002.
- 5) M. B. Celik, "Experimental Determination of Suitable Ethanol-Gasoline Blend Rate at High Compression Ratio for Gasoline Engine," Applied Thermal Engineering, Vol.28, pp.396-404, 2008.
- 6) E. R. Strevva, L. V. M. Pereira, J. R. Sodre and V. M. D. Pasa, "Gasoline-Ethanol Blend Aging Effect on Engine Performance and Exhaust Emissions," SAE 2003-01-3184, 2003.
- 7) C.-W. Wu, R.-H. Chen, J.-Y. Pu and T.-H. Lin, "The Influence of Air-Fuel Ratio on Engine Performance and Pollutant Emission of an SI Engine Using Ethanol-Gasoline Blended Fuels," Atmospheric Environment, Vol.38, pp.7093-7100, 2004.
- 8) W. Li, Y. Wang, L. Zhou and L. Su, "Study on Improvement of Fuel Economy and Reduction in Emissions for Stoichiometric Gasoline Engines," Applied Thermal Engineering, Vol.27, pp.2919-2923, 2007.
- 9) W. W. Pulkrabek, Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, pp.332-348, Pearson Prentice Hall, 2006.