

SI엔진에서 바이오에탄올-가솔린 혼합을 및 공연비 변화에 따른 연소 및 배기배출물 특성에 관한 연구

윤 승 현¹⁾ · 하 성 용²⁾

영남이공대학교 자동차계열 · 신한대학교 자동차공학과

A Study on the Combustion and Exhaust Emission Characteristics with the Variations of Mixing and Air-fuel Ratio of Bio-ethanol - Gasoline in a SI Engine

Seunghyun Yoon¹⁾ · Sungyong Ha²⁾

¹⁾Division of Automobiles, Yeungnam University College, Daegu 42415, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Shinhan University, Gyeonggi 11644, Korea

(Received 27 November 2015 / Revised 16 January 2016 / Accepted 1 February 2016)

Abstract : The combustion and exhaust emission characteristics in a spark ignition (SI) engine with various test fuels (bioethanol - gasoline blends) and air-fuel ratio were investigated in this research. To investigate the influence of the excess air ratio and ethanol blends on the combustion characteristics such as the cylinder pressure, rate of heat release (ROHR), and fuel consumption rate were analyzed. In addition, the reduction effects of exhaust emissions such as carbon monoxide (CO), unburned hydrocarbon (HC), and oxides of nitrogen (NOx) were compared with those of neat gasoline fuel under the various excess-air ratios.

The results showed that the peak combustion pressures and the ROHR of bioethanol fuel cases were slightly higher than those of gasoline fuel at all test ranges and fuel ratio. As compared with gasoline fuel (G100) at each given excess air ratio, BSFC of bio-ethanol was increased. The CO, HC, NOx emissions of bio-ethanol blends were lower than those of gasoline fuel under overall experimental conditions.

Key words : Bioethanol(바이오에탄올), Alternative fuel(대체연료), Combustion characteristics(연소특성), Exhaust emission(배기배출물), Gasoline engine(가솔린엔진)

Nomenclature

- SI : spark ignition
- WOT : wide open throttle
- BTDC : before top dead center
- ROHR : rate of heat release
- HC : hydrocarbon
- CO : carbon monoxide
- NO_x : nitrogen oxides

1. 서론

최근 화석연료를 사용하는 내연기관으로부터 발생하는 유해 배기 배출물과 온실가스 배출저감 등의 환경문제에 대응하고, 화석 연료의 고갈에 대응하기 위하여 대체 에너지 자원의 개발과 적용에 대한 연구가 여러 연구자들에 의하여 활발하게 진행되고 있다.^{1,2)} 대체연료 중 가솔린기관에 적용할 수 있는 바이오에탄올(bioethanol)은 곡물이나 곡식 등 식물성 원료에서 추출할 수 있는 재생 가능한 에너

*Corresponding author, E-mail: hsy1396@naver.com

지이며, 연료 내 산소를 포함(35 % wt)하고 있는 합산소연료이기 때문에 연소과정에서 유해 물질의 생성을 저감시킬 수 있는 특성을 가지고 있는 친환경 연료이다. 또한 바이오에탄올은 옥탄가(octane number)가 높아 안티노크성이 우수하여 기존의 스파크 점화 기관에 적용할 경우, 압축비 증가와 점화시기 조절을 통하여 열효율을 높일 수 있고, 가솔린 대비 약 3배 높은 증발 잠열로 인하여 흡입 및 압축과정 중, 흡입 공기와 기관의 냉각 효과를 가져와 엔진의 체적효율을 향상시킬 수 있는 여러 장점을 가지고 있다.^{3,4)}

그러나 에탄올연료는 단위 질량당 저위발열량 (low heating value)이 기존 가솔린 연료보다 약 40 % 낮기 때문에 동일한 운전조건에서 가솔린연료를 적용하였을 때와 동일한 엔진성능을 추구할 경우 필연적으로 에탄올의 연료소비율이 증가하는 문제점을 가지고 있다.^{5,6)} 이러한 에탄올연료의 단점을 해결하기 위한 방법 중 하나가 연료 효율을 증가시킬 수 있는 희박연소이다. 희박연소를 적용할 경우, 상대적으로 풍부한 흡입 공기로 인해 연소성능이 향상되며 높은 옥탄가를 이용하여 점화시기 조절을 통한 연소성능 향상 등의 장점이 있다. 또한 공급되는 연료의 감소로 인하여 CO 및 HC 배출물 등의 유해 배기가스 배출이 저감되는 장점을 가지고 있다.⁷⁻⁹⁾

따라서 본 연구에서는 스파크 점화기관에 바이오에탄올-가솔린 혼합연료를 적용하여 다양한 운전 조건(공기과잉률, 점화시기 및 혼합비율)에서 최적의 연소 및 배기특성을 실험적으로 규명하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 다양한 에탄올-가솔린 연료 혼합비율을 형성하여 각각의 혼합비율에 따른 연소특성, 희박연소특성 및 배기특성을 분석하였으며, 이를 통해 각 성능 특성 별 최적의 에탄올-가솔린 혼합비율, 점화시기 및 공기과잉률 영역을 실험적으로 규명하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 실험 장치는 엔진, 엔진제어 시스템, 연소데이터 취득 시스템 그리고 배기배출물 측정 시스템으로 구성되었으며, 실험 장치 개략도를

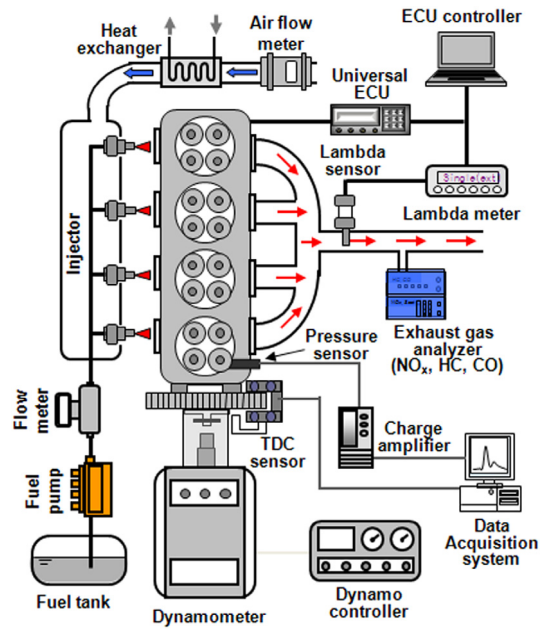


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of test engine

Description		Specification
Engine type		4 cylinders, DOHC SI engine
Bore (mm) × Stroke (mm)		77 × 85.44
Displacement volume (cc)		1,591
Compression ratio		10.5
Ignition sequence		1-3-4-2
Injection sequence		1-3-4-2
Invoke valve	open (°CA ATDC)	10
	close (°CA ABDC)	ABDC 63
Exhaust valve	open (°CA BBDC)	BBDC 40
	close (°CA ATDC)	ATDC 3
Ignition system		DLI (Distributor less ignition)
Maximum power		89 kW at 6200 rpm
Maximum torque		15.6 kg·m at 4200 rpm

Table 2 Specifications of the emissions analyzer

Item	Specification
Measuring method	CO, HC: non-dispersive infrared rays NO _x : chemical method
Measuring range	HC: 0 ~ 10,000 ppm vol. CO: 0 ~ 10 vol. % NO _x : 0 ~ 4,000 ppm vol.
Measuring accuracy	HC: ± 12 ppm vol. CO: ± 0.06 vol. % NO _x : ± 1.0 ppm vol.

Fig. 1에 나타내었다. 실험용 엔진은 압축비 10.5:1이고, 배기량이 $1,591\text{cm}^3(\text{cc})$ 인 직렬 4기통 PFI(Port Fuel Injection)형 SI(Spark Ignition) 엔진을 사용하였고, 주요 엔진제원은 Table 1과 같다. 실험엔진의 회전속도 및 엔진부하를 제어하고 제동토크 등을 측정하기 위하여 수냉식 와전류 전기동력계(EC dynamometer, 150 kW DC at 8,000 rpm)를 사용하였다.

엔진의 연료분사량, 분사시기 및 점화시기를 조절하기 위하여 범용 ECU (EMS-4, AEM)를 사용하였으며, 배기관에 장착된 광대역 램다센서시스템(Inline Wideband UEGO, AEM)을 ECU와 연동시켜 실시간 연료 분사량을 피드백 제어하는 방식으로 공연비를 제어하였다. 실험 엔진의 1번 실린더에 점화플러그 일체형 피에조압전센서(6052B, Kistler)를 장착하고 Labview 소프트웨어와 압력데이터취득시스템(SC-2345, National Instrument)을 사용하여 연소실내 압력신호, 흡입공기량, 흡기온도, 냉각수온도, 배기가스온도 및 연료유량 등의 측정값을 실시간으로 취득하였고 이를 통해 연소압력 및 열발생을 및 연료소비율 등을 계산하여 연소특성을 파악하였다. 또한, 배기배출물 특성을 파악하기 위하여 배기후처리장치인 촉매를 제거하였으며, 배기가스 분석기(MEXA-551JK, Horiba)를 사용하여 CO, HC, NO_x 등의 배기배출물 들을 실시간 측정하여 데이터를 취득하였다.

2.2 실험 방법 및 조건

본 연구에 사용된 연료는 총 6종류로 바이오에탄올 혼합율에 따라 에탄올 100 %인 경우 E100, 80 %인 경우 E80 등으로 하여 E60, E40, E20 등으로 분류하고 이를 비교 연료인 가솔린(G100)을 사용하였다. 공연비 변화에 따른 특성을 파악하기 위하여 농후한 영역에서 희박한 조건까지 공기과잉률(λ , excess air ratio)을 1.2에서 0.8까지 0.1간격으로 연료분사기간 조절을 통하여 연료의 분사량을 변화 하였다. 본 연구에 사용한 연료의 물성치는 Table 3과 같다.

본 연구에 적용한 실험조건은 Table 4와 같으며, 실험에 앞서 각 연료들의 최대 진각 점화시기 MBT(Maximum Brake Torque)타이밍을 측정하였으며 일정한 엔진회전속도 4,200 rpm에서 스톱 밸브를 완

Table 3 Specifications of test fuel

Characteristics	Gasoline	Ethanol
Chemical formula	$\text{C}_n\text{H}_{1.87n}$	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$
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
Lower heating value (MJ/kg)	43.47	26.87
Air-fuel ratio	14.7	9.00

Table 4 Specifications of test engine

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 ~ 1.2
Engine speed (rpm)	4200
Engine Load (TP, %)	100
Ignition timing (°CA, BTDC)	0 ~ 50, MBT timing
Injection timing (°CA, BTDC)	400
Intake air temperature (°C)	40
Coolant temperature (°C)	75

전하게 개방한 전부하(WOT, Wide Open Throttle) 상태에서 실험을 진행하였다. 흡기온도 및 냉각수의 온도변화로 인한 실험결과의 변화에 영향을 최소화하기 위하여 각각 40 °C와 75 °C로 일정하게 유지하였고, 연료의 분사시기 또한 선행 실험을 통하여 획득한 최적의 분사시기인 BTDC 400°로 고정하였다. 본 연구에 사용한 연료의 물성치는 Table 4와 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 바이오에탄올 혼합율 및 공기과잉률 변화에 따른 연소 특성

Fig. 2(a) ~ (c)은 엔진회전속도 4,200 rpm, 고부하 조건(100 %)에서 공기과잉률 변화 ($\lambda=0.8, 1.0, 1.2$)에 따라 취득한 가솔린 연료와 바이오에탄올 및 혼합연료의 연소실내 연소압력과 그에 따른 열발생을 (ROHR, Rate Of Heat Release)을 나타낸 것이다.

공기과잉률 변화에 따른 연소실압력을 살펴보면 모든 실험연료들이 공기과잉률 1.0인 이론공연비 조건에서 최대연소압력값을 나타내었으며, 바이오

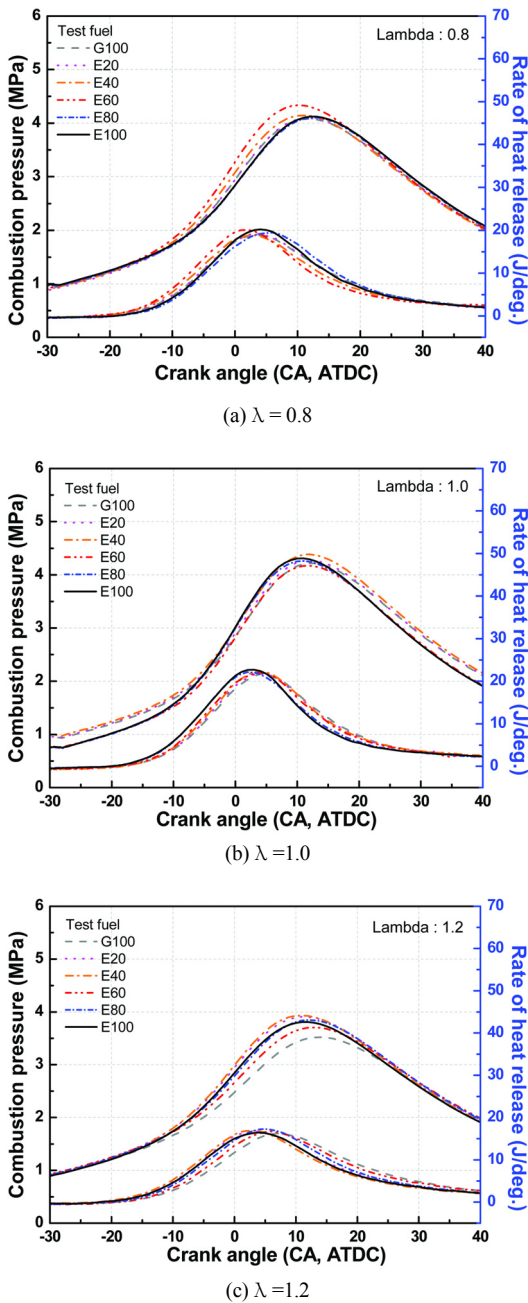


Fig. 2 Effect of the excess air-fuel ration and ethanol-gasoline blended fuel on the combustion characteristics

에탄올 및 혼합연료의 연소압력이 가솔린에 비하여 다소 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 에탄올 연료의 높은 옥탄가를 고려하여 MBT timing을 혼합율이 증가할수록 점화시기를 진각한 결과이며, 또한 바이

오에탄올 연료의 장점인 가솔린 연료보다 증발잠열이 크기 때문에 동일한 공기과잉률에서 흡입과정 중 가솔린 연료에 비하여 엔진의 체적효율이 향상되어 흡입공기량이 증가하고 압축행정에서 압축비가 증가한 결과로 판단되며, 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 및 변화의 폭이 가솔린에 비하여 적은 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 2(c)의 희박한 조건에서도 바이오에탄올 연료의 경우, 에탄올연료의 연소성능이 우수한 결과를 나타내었으며, 이는 바이오에탄올의 낮은 발열량을 고려하여 연료공급량(연료분사기간)을 증가시키고 이에 따른 에탄올 연료 내 포함된 산소량이 증가되어 실제 공기과잉률은 더욱 희박한 조건임을 고려할 때, 연소가 제대로 이루어지지 않는 실화나 부분연소 등의 영향을 바이오에탄올 연소가 가솔린 연료에 비하여 작게 받으며 연소성능이 우수한 것으로 판단된다.¹⁰⁾

Fig. 3은 공기과잉률과 혼합비율에 따른 에탄올-가솔린 혼합연료의 연료소비율과 제동연료소비율(BSFC, Brake Specific Fuel Consumption)을 나타낸 것이다. 공기과잉률(λ)이 농후한 영역에서 희박한 영역으로 갈수록 ($\lambda=0.8 \rightarrow 1.2$) 에탄올-가솔린 혼합연료의 연료소비율은 감소하지만, 이론공연비보다 희박한 조건에서는 제동연료소비율(BSFC)은 미약하게 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 에탄올 혼합량이 증가할수록 에너지 소비는 증가하였다. 이는 혼합기가 희박해짐에 따라 연료 공급량이 감소하게 연료소비율이 감소하지만, $\lambda=1.2$ 이상의 희박 영역에서는 연료 부족으로 인한 부분연소 등으로 인해 출력 저하가 발생하기 때문에 BSFC는 증가하는 것으로 판단된다.¹¹⁾ 이는 에탄올 연료의 단점인 단위질량당 발열량이 가솔린 연료의 60% 수준에 불과하기 때문에 동일한 엔진운전조건에서 에탄올의 연료 분사량이 증가하였기 때문이라 판단된다. 하지만 $\lambda=1.2$ 조건에서 E100과 G100의 제동연료소비율(BSFC)을 비교해 보면 그 차이가 약 30%

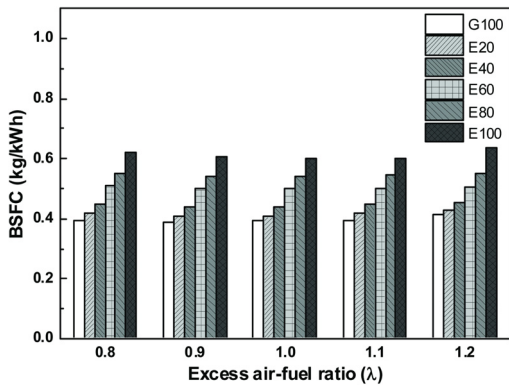


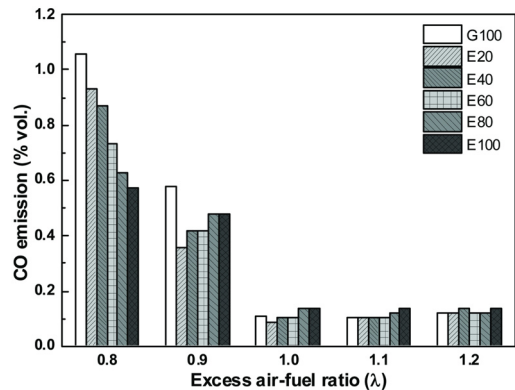
Fig. 3 Effect of the excess air-fuel ration and ethanol-gasoline blended fuel on the fuel consumption characteristics

미만으로 점화시기 조절과 에탄올 연료의 장점으로 인하여 에너지 소비를 감소시키는 결과를 얻었다.

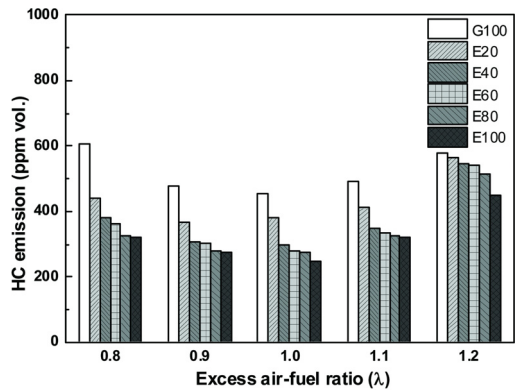
3.2 바이오에탄올 혼합물 및 공기과잉률 변화에 따른 배기배출물 특성

공기과잉률 변화와 에탄올혼합률 변화에 따른 HC, CO 및 NO_x 등의 배기배출물 특성을 Fig. 4(a) ~ (c)에 각각 나타내었다. CO의 경우 농후한 영역($\lambda < 0.9$)에서는 가솔린연료(G100)의 배출량이 급격히 증가하였으나, 희박한 영역($\lambda > 1.1$)에서는 모든 연료의 배출량이 희박연소로 인하여 급격히 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 농후한 영역에서는 산소 부족으로 인해 불완전 연소가 발생하여 CO의 배출량이 증가한 것으로 판단되며, 특히 농후한 영역에서 바이오에탄올 혼합연료의 CO 배출량이 가솔린에 비하여 적은 것은 바이오에탄올의 함산소 성분으로 판단된다.^{10,11)}

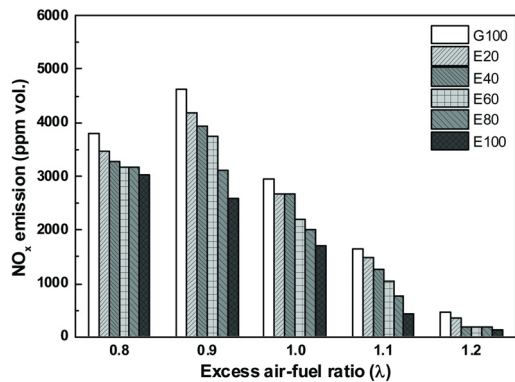
Fig. 4(b) HC emission의 경우 모든 연료가 이론공연비($\lambda=1.0$)에서 배출량이 최저임을 알 수 있다. 이는 이론공연비 조건에서 연소생성물의 산화를 촉진하여 HC의 배출량이 감소하였다고 판단된다. 또한 농후한영역($\lambda < 0.9$)과 희박영역($\lambda > 1.1$)에서 모든 연료의 HC 배출량이 다소 증가하고 있으며 이는 연료분사량이 연소에 필요한 분사량 보다 많거나 부족하기 때문에 연소에 필요한 산소는 상대적으로 감소되거나 증가되어 불완전 연소가 더욱 심화된 이유라 판단된다.¹²⁾ 에탄올 연료의 혼합률이 증가할 수록 공기과잉률 전 조건에서 감소하는 특성을 나



(a) CO emission



(b) HC emission



(c) NO_x emission

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

타내고 있으며 이는 바이오에탄올 연료의 함산소량의 증가로 인한 연소 상태를 개선하고 실화 또는 부분연소 등이 적게 발생한 이유라 판단된다.^{11,12)}

Fig. 4(c) NO_x의 경우 공기과잉률 전 영역에서 바이오에탄올 및 혼합연료의 배출량이 가솔린의 배출량에 비하여 작으며, 에탄올 혼합률이 증가할수록 감소하는 결과를 확인할 수 있었다. 이는 바이오에탄올의 높은 증발잠열로 인한 흡입행정 말기에 실린더 내부의 온도가 감소되고 폭발행정 중 열발생이 가솔린 연료에 비하여 적기 때문에 NO_x의 배출량이 가솔린 연료에 비하여 적은 것으로 판단된다. 또한 공기과잉률이 희박한 영역으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다.

4. 결론

바이오에탄올 SI 엔진에서 에탄올-가솔린 연료 혼합비율과 공기과잉률 변화에 따른 연소 및 배기 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모든 실험연료들이 공기과잉률 1.0인 이론공연비 조건에서 최대연소압력을 나타내었고, 바이오에탄올 및 혼합연료의 연소압력이 가솔린에 비하여 다소 증가하는 결과를 나타내었다.
- 2) 희박한 조건($\lambda=1.2$)에서 바이오에탄올 연료의 경우, 실화나 부분연소 등의 영향을 바이오에탄올 연소가 가솔린 연료에 비하여 적게 받으며 연소 성능이 우수하였다.
- 3) 공기과잉률(λ)이 농후한 영역에서 희박한 영역으로 갈수록($\lambda=0.8 \rightarrow 1.2$) 에탄올-가솔린 혼합연료의 연료소비율은 감소하지만, 이론공연비보다 희박한 조건에서는 제동연료소비율(BSFC)는 미약하게 증가하는 결과를 보였다.
- 4) CO배출물의 경우 농후한 영역($\lambda < 0.9$)에서는 가솔린연료(G100)의 배출량이 급격히 증가하였으나, 희박한 영역($\lambda > 1.1$)에서는 모든 연료의 배출량이 희박연소로 인하여 급격히 감소함을 확인할 수 있었으며, 농후한 영역에서 바이오에탄올 혼합연료의 CO 배출량이 가솔린에 비하여 감소하는 결과를 얻었다.
- 5) NO_x의 경우 공기과잉률 전 영역에서 바이오에탄올 및 혼합연료의 높은 증발잠열로 인한 연소실 온도 및 연소온도 감소로 인하여 배출량이 가솔린의 배출량에 비하여 작으며, 에탄올 혼합률이 증가할수록 감소하는 결과를 확인할 수 있었다.

References

- 1) D. Y. Lee, M. Y. Kim, S. Y. Ha, H. G. Roh and C. S. Lee, "Combustion and Exhaust Emission Characteristics of a SI Engine Fueled with Ethanol-Gasoline Blended Fuel," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.428-433, 2007.
- 2) N. Vinayagam and G. Nagarajan, "Experimental Study of Performance and Emission Characteristics of Dea-Assited Minimally Processed Ethanol Fueled HCCI Engine," Int. J. Automotive Technology, Vol.15, No.4, pp.517-523, 2014.
- 3) B. Y. Xu, L. Y. Qi, W. B. Zhang and S. L. Cai, "Fuel Properties and Emissions Characteristics of Ethanol-Diesel Blended on Small Diesel Engine," Int. J. Automotive Technology, Vol.8, No.1, pp.9-18, 2007.
- 4) 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.
- 5) C. W. Park, C. G. Kim, Y. Choi, S. M. Oh and G. H. Lim, "The Performance and Emission Characteristics on Operating Condition for the SI Engine Fuel with Gasoline-Ethanol and Hydrogen Enriched Gas," Transactions of KSAE, Vol.18, No.1, pp.23-30, 2010.
- 6) S. Diana, V. Giglio, B. Iorio and G. Police, "A Strategy to Improve the Efficiency of Stoichiometric Spark-Ignition Engines," SAE 961953, 1996.
- 7) 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.
- 8) J. W. G. Turner, R. J. Pearson, B. Holland and R. Peck, "Alcohol-Based Fuels in High Performance Engines," SAE 2007-01-0056, 2007.
- 9) N. Jeuland, X. Montagne and X. Gautrot, "Potentiality of Ethanol as a Fuel for Dedicated Engine," Oil&Gas Science and Technology, Vol.59, No.6, pp.559-570, 2004.

- 10) S. H. Yoon, D. S. Kim and C. S. Lee, "Effect of Ethanol-gasoline Blending Ratio on Lean Combustion and Exhaust Emissions Characteristics in a SI Engine Fueled with Bioethanol," Transactions of KSAE, Vol.19, No.1, pp.82-88, 2011.
- 11) D. S. Kim, S. H. Yoon and C. S. Lee, "Effect of Air-fuel Ratio on Combustion and Emission Characteristics in a Spark Ignition Engine Fueled with Bio-ethanol," Transactions of KSAE, Vol.18, No.1, pp.37-43, 2010.
- 12) 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.