

바이오에탄올 SI 엔진에서 에탄올-가솔린 연료 혼합비율에 따른 희박연소 및 배기 특성

윤 승 현¹⁾ · 김 대 성¹⁾ · 이 창 식^{*2)}

한양대학교 대학원¹⁾ · 한양대학교 기계공학부²⁾

Effect of Ethanol-gasoline Blending Ratio on Lean Combustion and Exhaust Emissions Characteristics in a SI Engine Fueled with Bioethanol

Seung Hyun Yoon¹⁾ · Dae Sung Kim¹⁾ · 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 20 January 2010 / Accepted 16 June 2010)

Abstract : Lean combustion and exhaust emission characteristics in a ethanol fueled spark-ignited engine according to ethanol-gasoline fuel blending ratio were investigated. The test engine was 1591 cm³ and 10.5 of compression ratio SI engine with 4 cylinders. In addition, lambda sensor system was connected with universal ECU to control the lambda value which is varied from 1.0 to 1.5. The engine performance and lean combustion characteristics such as brake torque, cylinder pressure and rate of heat release were investigated according to ethanol-gasoline fuel blending ratio. Furthermore, the exhaust emissions such as carbon monoxide (CO), unburned hydrocarbon (HC), nitrogen oxides (NO_x) and carbon dioxide (CO₂) were measured by emission analyzers. The results showed that the brake torque, cylinder pressure and the stability of engine operation were increased as ethanol blending ratio is increased. Brake specific fuel consumption (BSFC) was increased in higher ethanol blending ratio while brake specific energy consumption (BSEC) was decreased in higher ethanol blending ratio. The exhaust emissions were decreased as ethanol blending ratio is increased under overall experimental conditions, however, some specific exhaust emission characteristics were mainly influenced by lambda value and ethanol-gasoline fuel blending ratio.

Key words : Blended fuel(혼합연료), Emission characteristics(배기특성), Ethanol(에탄올), Lean combustion(희박연소), Spark ignition engine(스파크 점화 기관)

1. 서 론

화석연료의 고갈을 대비하고 점차 강화되는 환경 규제를 만족시키기 위해 최근 대체연료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1,2)} 가솔린 연료의 대체 연료로 적용되고 있는 에탄올연료는 밀, 옥수수, 사탕수수 등 식물에서 추출할 수 있는 재생 가능 에너지이며, 분자구조에 산소를 포함하고 있는 합산소

연료(oxygenated fuel)이기에 연소과정에서 유해물질의 생성을 저감시킬 수 있는 특성을 가지고 있는 친환경 대체연료이다. 또한 에탄올연료는 옥탄가가 높아 안티노크성(anti-knock)이 우수하기 때문에 기존의 스파크 점화기관에 적용할 경우, 압축비를 증가시켜 열효율을 높일 수 있으며, 점화시기 진각을 통해 엔진성능을 보다 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 그리고 에탄올연료는 증발잠열이 높아서 흡입 과정 중, 흡입 공기를 냉각시켜 엔진의 체적효율

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

을 향상시킬 수 있다.^{3,4)}

그러나 에탄올연료는 단위 질량당 발열량이 가솔린 연료보다 낮기 때문에 가솔린연료를 적용하였을 때와 동일한 엔진성능을 추구할 경우 필연적으로 에탄올연료의 소비량이 증가하는 단점이 있다.⁵⁾ 이러한 에탄올연료의 단점을 해결하기 위한 방법 중 하나가 연료소비율을 감소시키는 희박연소이다. 희박연소를 적용할 경우, 상대적으로 풍부한 흡입 공기로 인해 연소성능이 향상되며, 분사시기 조절에 따라 성층화 연소가 가능하여 희박한계가 확장되는 장점이 있다. 또한 희박연역에서 CO, HC 등의 유해 배기가스 배출이 저감되는 장점도 있다.^{6,7)}

본 연구에서는 스파크 점화기관에 에탄올-가솔린 혼합연료를 적용하여 연료 혼합비율에 따른 희박연소 및 배기특성을 실험적으로 규명하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 다양한 에탄올-가솔린 연료 혼합비율을 형성하여 각각의 혼합비율에 따른 엔진성능특성, 희박연소특성 및 배기특성을 비교 및 분석하였으며, 이를 통해 각 성능 특성 별 최적의 에탄올-가솔린 혼합비율 및 공연비 영역을 실험적으로 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험 장치는 실험엔진, 엔진 전자제어 시스템, 데이터 취득 시스템 그리고 배기 배출물 측정 시스템의 네 부분으로 구성되었으며, 실험 장치 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

실험엔진은 압축비 10.5이고 배기량이 1591cm³인 4기통 SI 엔진을 사용하였고, 그 주요 제원은 Table 1과 같다. 실험엔진의 회전속도 및 엔진부하를 제어하고 제동토크 등을 측정하기 위하여 75kW 와전류 전기동력계(EC dynamometer)를 사용하였다.

정확한 상사점(TDC)을 검출하기 위하여 엔진 크랭크축에 로터리 엔코더를 장착하였으며, 실험엔진의 1번 실린더에 점화플러그 일체형 압력센서(6052B, Kistler)를 장착하여 연소압력 파형을 취득하였고 이를 통해 연소압력 및 열발생을 등을 계산하여 희박연소특성을 파악하였다.

엔진 전자제어 시스템에서는 점화코일, 인젝터,

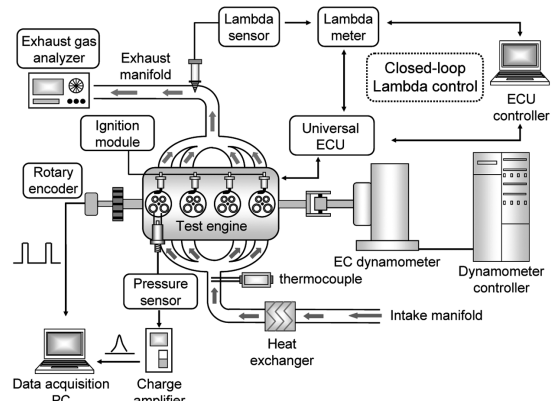


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

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

아이들 스피드 밸브 등을 제어할 수 있는 범용 ECU를 장착하였고, 배기 배니폴드에 장착된 람다센서(LSU4, Bosch)와 람다미터(PLM, MOTEC)를 ECU와 연동시켜 연료 분사시간을 피드백 제어하는 방식으로 공연비를 제어하였다.

연소압력 데이터 취득은 Labview 소프트웨어와 데이터 취득 보드(SC-2345, National instrument)를 사용하여 압력신호 등의 실험데이터를 실시간으로 수집하였다. 배기측정 시스템에서는 배기가스 분석기(MEXA- 551JK, HORIBA)를 사용하여 CO, HC, NO_x 그리고 CO₂ 등의 배기 배출물을 측정하였고, 배기가스는 삼원촉매의 영향을 배제하기 위하여 삼원촉매 전단부에서 추출하였다. 또한 실험 연료로는 순수 가솔린연료(G100)와 순수 에탄올연료(E100)

Table 2 Properties of test fuels

Characteristic	Gasoline	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)	43.47	26.87
A/F ratio (by volume)	14.7	9.00

를 기본으로 하여 가솔린 연료에 에탄올 연료를 부피기준으로 20% 혼합한 E20, 40% 혼합한 E40, 60% 혼합한 E60 및 80% 혼합한 E80의 총 6개의 연료를 사용하였으며, 실험연료의 물성을 Table 2에 나타내었다.

2.2 실험 방법

에탄올-가솔린연료 혼합비율에 따른 희박연소 및 배기특성을 살펴보기 위하여 공연비는 λ=1.0에서 λ=1.5까지 0.1 단위로 변화시켰으며, 엔진회전속도는 2500rpm으로 일정하게 유지하였고, 엔진부하는 희박연소임을 감안하여 스로틀개도 기준으로 20% 개방한 상태에서 실험을 진행하였다. 실험 범위 전 영역에서 흡입공기 온도와 냉각수 온도는 각각 40°C와 70°C로 일정하게 유지하였고, 냉각수 온도가 70°C 근방에서 안정화 된 후 실험을 진행하였으며, 연료 분사시기는 BTDC 40° 로 고정하였다.

기초실험을 통해 각각의 혼합연료와 공연비 영역에서 점화시기를 TDC 에서 BTDC 50°까지 5° 간격으로 변화시키며 제동토크를 측정하여 최대토크를

Table 3 Experimental conditions

Item	Conditions
Test fuel	Gasoline, Ethanol, Blended fuel
Excess air ratio (λ)	1.0 ~ 1.5
Engine speed (rpm)	2500
Engine load (% ,TP)	20
Ignition timing	MBT timing
Intake air temperature (°C)	40
Coolant temperature (°C)	70
Injection timing (°CA BTDC)	400

나타내는 점화시기를 MBT 타이밍(maximum brake torque)으로 선택하였고, 본 실험에서 모든 점화는 MBT 타이밍에서 이루어지도록 하였다. 또한, 연료 소비율을 측정하기 위하여 연료소비율 측정시스템 (FG100, Froude)을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 에탄올-가솔린 혼합연료의 엔진성능 특성

Fig. 2는 공연비 변화에 따른 에탄올-가솔린 혼합연료의 제동토크를 나타낸 것이다. 실험에 사용한 혼합연료 모두 공연비가 희박한 영역으로 갈수록 제동토크가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 공연비가 희박한 영역으로 갈수록 소비하는 연료의 양이 감소하기 때문이라고 판단된다. 그리고 동일한 공연비 영역에서는 에탄올연료의 혼합비율이 높을수록 제동토크가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 에탄올연료의 높은 증발잠열로 인해 흡입공기의 밀도가 상승하여 엔진의 체적효율이 증가한 이유로 판단된다. 또한 에탄올연료는 옥탄가가 높기 때문에 가솔린연료에 비하여 점화시기 진각이 가능하고, 진각된 점화시기에 의해 제동토크가 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 3은 공연비 변화에 따른 에탄올-가솔린 혼합연료의 배기가스 온도를 나타낸 것이다. 배기가스 온도는 공연비가 희박한 영역으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었고, 동일 공연비 영역에서는 에탄올 혼합비율 증가할수록 배기가스온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 에탄올 연료의 높은 증

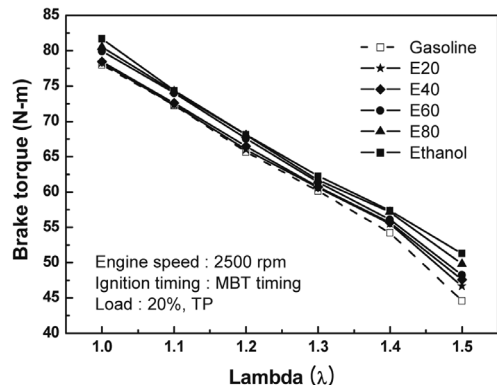


Fig. 2 Brake torque of ethanol-gasoline blended fuel

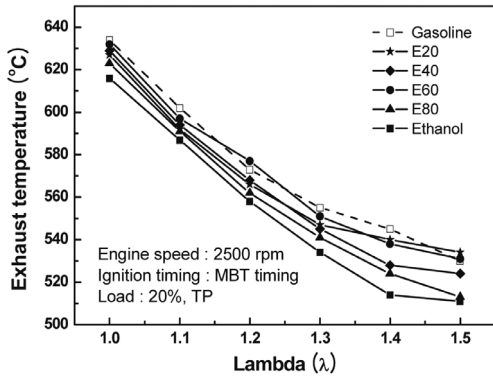


Fig. 3 Exhaust temperature of ethanol-gasoline blended fuel

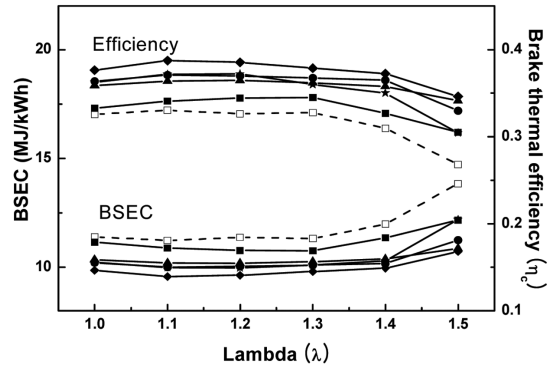


Fig. 5 BSEC and brake thermal efficiency of ethanol-gasoline blended fuel

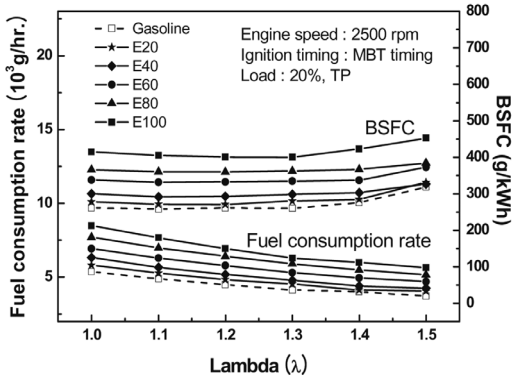


Fig. 4 Fuel consumption rate and BSFC of ethanol-gasoline blended fuel

발잠열에 의한 연료-공기 혼합기의 냉각효과와 에탄올연료의 낮은 단열화염 온도가 복합적으로 영향을 미친 이유라 판단된다.⁸⁾

Fig. 4는 공연비 변화에 따른 에탄올-가솔린 혼합연료의 제동연료소비율(BSFC, brake specific fuel consumption)을 나타낸 것이다. 공연비가 희박한 영역으로 갈수록 에탄올-가솔린 혼합연료의 연료소비율은 감소하지만 BSFC는 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 희박한 영역으로 갈수록 연료 소비량이 감소하여 연료소비율이 감소하는 것으로 판단되며, $\lambda=1.4$ 이상의 희박 영역에서는 연료 부족으로 인한 부분연소 등으로 인해 출력 손실이 발생하기 때문에 BSFC는 증가하는 것으로 판단된다. 또한 에탄올 연료의 혼합비율이 높을수록 연료소비율이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

이는 에탄올의 단위질량당 발열량이 가솔린 연료

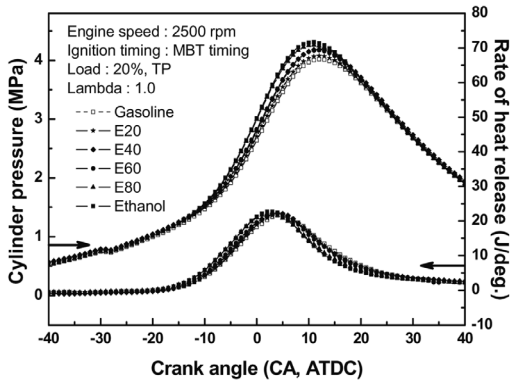
의 60% 수준에 불과하기 때문에 동일한 엔진운전조건에서 에탄올의 연료 분사량이 증가하였기 때문이라 판단된다.

Fig. 5는 공연비 변화에 따른 에탄올-가솔린 혼합연료의 제동에너지소비율(BSEC, brake specific energy consumption)과 제동 열효율을 나타낸 것이다. 발열량을 고려한 BSEC의 경우에는 가솔린 연료가 가장 높았으며, E40이 가장 낮게 나타났다. 이러한 결과를 통해 소비한 연료를 에너지로 변환하는 효율은 에탄올 연료가 가솔린 연료에 비하여 우수함을 알 수 있으며, E40의 제동 열효율이 가장 우수함을 확인할 수 있었다.

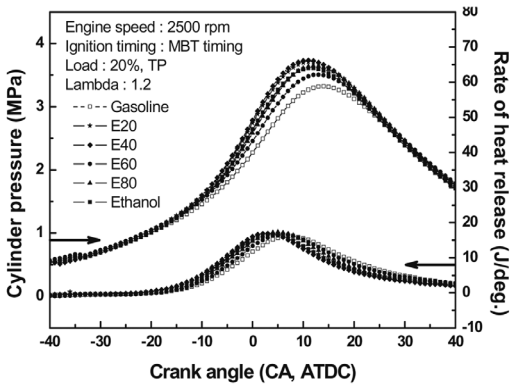
3.2 에탄올-가솔린 혼합연료의 연소특성

Fig. 6(a) ~ (c)은 공연비 변화에 따른 에탄올-가솔린 혼합연료의 연소실 압력 및 열발생율을 나타낸 것이다.

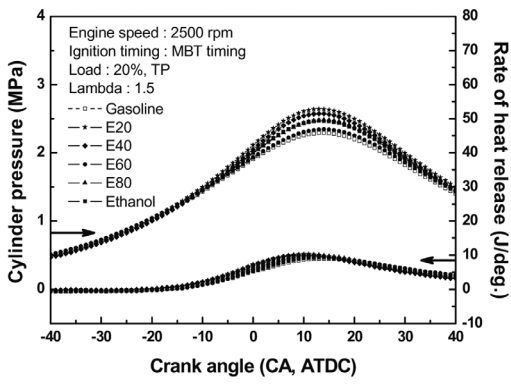
공연비가 희박한 영역으로 갈수록 연소실 압력이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 전반적으로 에탄올-가솔린 혼합연료의 연소 압력이 가솔린 연료에 비하여 높은 것을 확인할 수 있었다. 이는 희박한 영역으로 갈수록 연료 소비량이 감소되어 연소압력이 낮아지는 것으로 판단되며, 에탄올 연료는 분자 구조에 산소를 포함하고 있는 합산소 연료이기 때문에 연소과정 중, 합산소 성분이 연소 반응을 더욱 활성화시키기 때문에 에탄올-가솔린 혼합연료의 연소 압력이 순수 가솔린 연료에 비하여 높은 것으로 판단된다.



(a) $\lambda=1.0$



(b) $\lambda=1.2$



(c) $\lambda=1.5$

Fig. 6 Cylinder pressure and rate of heat release of ethanol-gasoline blended fuel

Fig. 7은 도시평균유효압력 변동계수(COVIMEP)를 고려한 에탄올-가솔린 혼합연료의 연소안정성을 나타낸 것이다. 실험에 사용한 전체 혼합연료가 $\lambda=1.5$ 영역에서 변동계수가 급격히 증가하는 것을

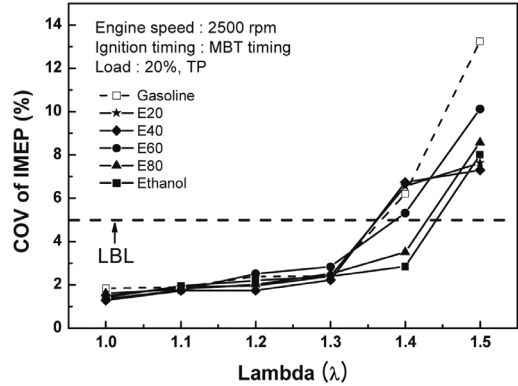


Fig. 7 COV of IMEP of ethanol-gasoline blended fuel

확인할 수 있었다. 이는 과도하게 희박한 영역에서는 연료의 부족으로 인해 발생하는 부분연소 등의 영향을 받아 각각의 사이클에 대한 연소 불균형이 심화된 이유라 판단된다. 또한 연소안정성 판단의 일반적 기준인 COVIMEP=5를 희박한계(LBL, lean burn limit)로 설정하였을 때, E80과 E100의 경우 $\lambda=1.4$ 영역까지 희박한계를 확장하는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 결과는 에탄올의 혼합비율이 높은 E80과 E100의 경우 높은 옥탄가로 인해 노크 등의 이상연소 영향을 적게 받은 이유라 판단되며, 희박영역으로 갈수록 낮은 발열량을 보상하기 위해 연료분사기간이 증가되어 부분연소 등의 영향을 적게 받은 이유라 판단된다.

3.3 에탄올-가솔린 혼합연료의 배기특성

Fig. 8, 9는 공연비 변화에 따른 에탄올-가솔린 혼합연료의 CO와 HC의 배기특성을 나타낸 것이다. CO의 경우 희박한 영역으로 갈수록 배출량이 급격히 감소하지만 $\lambda=1.5$ 영역에서 배출량이 미세하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 희박한 영역으로 갈수록 배기에 산소가 풍부해져서 산화되기 때문에 CO 배출량이 급격히 감소하는 것으로 판단된다. $\lambda=1.5$ 영역에서 CO의 발생량이 증가하는 이유는 공기과잉에 따른 불완전연소가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

HC의 경우 $\lambda=1.4$ 이상의 영역에서 배출량이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 에탄올 혼합비율

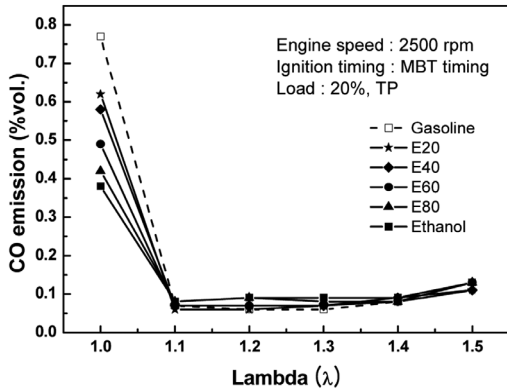


Fig. 8 CO emission of ethanol-gasoline blended fuel

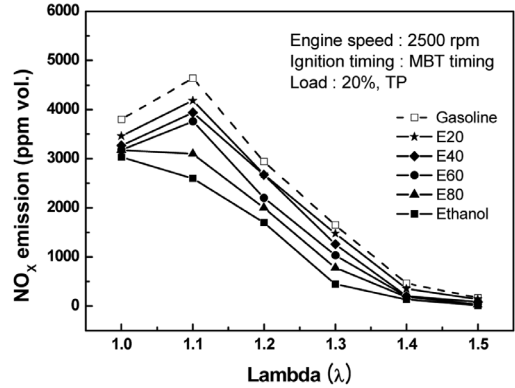


Fig. 10 NO_x emission of ethanol-gasoline blended fuel

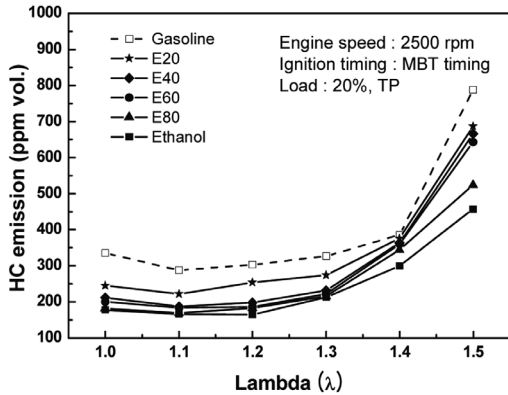


Fig. 9 HC emission of ethanol-gasoline blended fuel

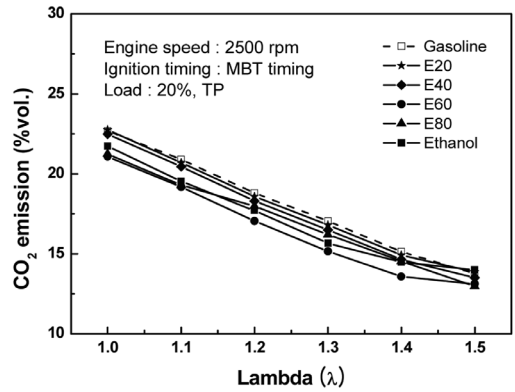


Fig. 11 CO₂ emission of ethanol-gasoline blended fuel

이 높을수록 배출량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 에탄올 연료의 함산소 성분이 연소상태를 개선하여 실화 또는 불완전 연소 등이 적게 발생한 이유라 판단된다.

Fig. 10의 NO_x 경우 λ=1.1 근방의 다소 희박한 영역에서 배출량이 최대가 되었고, 희박한 영역으로 갈수록 배출량이 점점 감소하였다. 그리고 에탄올 혼합비율이 높을수록 배출량이 감소하였다. 이는 에탄올 연료의 높은 증발잠열로 인해 흡입행정 말기에 연소실 내부의 온도가 감소하여 폭발행정 중의 급격한 온도상승이 억제된 이유라 판단된다.

Fig. 11 CO₂의 경우 공연비가 증가할수록 배출량이 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 희박한 영역으로 갈수록 연소에 참여하는 연료의 양이 감소하게 되고, 상대적으로 공기의 양은 증가하여 실화 또는 부분연소 등이 발생하기 때문에 완

전연소의 산물인 CO₂의 배출이 감소되었다고 판단된다.

4. 결론

바이오에탄올 SI 엔진에서 에탄올-가솔린 연료 혼합비율에 따른 희박연소 및 배기특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공연비가 희박한 영역으로 갈수록 에탄올-가솔린 혼합연료의 제동토크와 배기가스온도는 모두 감소하는 경향을 나타내었으며, 에탄올 혼합비율이 높을수록 제동토크는 증가하는 경향을 나타내었고 배기가스온도는 감소하는 경향을 나타내었다.
- 2) 공연비가 희박한 영역으로 갈수록 에탄올-가솔린 혼합연료의 연료소비율은 감소하였고 BSFC는 증가하는 경향을 나타내었다. BSEC의 경우

가솔린 연료가 가장 높게 나타났으며, 제동열효율의 경우 E40이 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

- 3) 공연비가 희박한 영역으로 갈수록 에탄올-가솔린 혼합연료의 연소실 압력 및 열발생율은 감소하는 경향을 나타내었고, 에탄올 혼합비율이 증가할수록 연소안정성이 증가하였다. E80과 E100의 경우 희박한계가 $\lambda=1.4$ 영역까지 확장되는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 공연비가 희박한 영역으로 갈수록 CO의 배출량은 감소되는 경향을 나타내었으나, HC의 경우에는 $\lambda=1.3$ 영역부터 증가하는 경향을 나타내었다. NO_x의 경우 $\lambda=1.1$ 영역에서 배출량이 최대가 되었으며 에탄올 혼합비율이 증가할수록 배출량이 감소되는 것을 확인할 수 있었다. CO₂의 경우 공연비가 높아짐에 따라 배출량이 선형적으로 감소하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 인력 양성사업 및 클린 신연료 동력시스템 개발 사업과 환경부 Eco-STAR project (무·저공해 자동차 사업단), 2단계 두뇌한국 21 사업의 지원으로 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

References

- 1) 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.
- 2) E. R. Streva, L. Vinicius, 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.
- 3) 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.
- 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) D. Y. Lee, M. Y. Kim, S. Y. Ha, H. G. Roh and C. S. Lee, "Combustion and Emission Characteristics of a SI Engine Fueled with Ethanol-Gasoline Blended Fuel," Fall Conference Proceedings, KSAE, Vol.1, pp.428-433, 2007.
- 6) F. N. Alasfour, "Lean Misfire Limite of LPG Fueled S.I. Engine," SAE 2001-01-1960, 2001.
- 7) S. W. Park, H. M. Kim and K. H. Lee, "A Study on the Characteristics of Lean Burn Combustion according to Injection Timing in DISI Engine," Fall Conference of KSME, pp.12-18, 2007.
- 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.