

# SI 엔진에서 바이오에탄올 연료(E100)의 연소 및 배기특성

하성용\* · 이창식†

(2008년 3월 10일 접수, 2008년 6월 10일 수정, 2008년 7월 3일 심사완료)

## Combustion and Exhaust Emission Characteristics of Bio-Ethanol Fuel(E100) in SI Engine

Sung Yong Ha and Chang Sik Lee

**Key Words** : SI Engine(불꽃점화엔진), Bio-Ethanol(바이오-에탄올), Combustion Characteristics (연소특성), Exhaust Emission Characteristics(배기특성)

### Abstract

An experimental investigation was conducted to investigate the effect of Bio-ethanol fuel on the engine performance and exhaust emission characteristics under various engine operating conditions. To investigate the effect of bio-ethanol fuel, the commercial 1.6L SI engine equipped with 4 cylinder was tested on EC dynamometer. The engine performance including brake torque, brake specific fuel consumption, and brake specific energy consumption of bio-ethanol fuel was compared to those obtained by pure gasoline. Furthermore, the exhaust emissions were analyzed in terms of regulated exhaust emissions such as unburned hydrocarbon, oxides of nitrogen, and carbon monoxide. Result of this work shows that the effect of blending of ethanol to gasoline caused drastic decrease of emissions under various operating conditions. Also, improved engine performance such as brake torque and brake power were indicated for bio-ethanol fuel.

### 기호설명

- ECM : 전자제어 모듈
- MBT : 최대토크가 나타나는 점화시기
- BMEP : 제동평균유효압력
- NOx : 질소산화물

### 1. 서론

최근의 자동차 배출가스에 의한 지구온난화 문제 및 유가 상승으로 인하여 자동차의 배출가스 저감과 연비향상에 대한 요구가 계속 증대되고 있다. 특히, 화석연료의 사용에 따른 지구온난

화와 매장량 및 공급량의 한계로 기존의 석유자원을 대체할 수 있는 청정 대체연료의 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 대체연료로 각광받고 있는 연료로는 천연가스, 바이오디젤, 수소, 알코올등이 있으며, 그 중 알코올계 연료인 바이오에탄올은 친환경 대체연료로서 사탕수수나 옥수수, 밀과 같은 농작물의 발효 및 농축, 증류과정을 통해 제조할 수 있으며, 온실가스의 발생을 억제할 수 있는 친환경 대체연료로 주목 받고 있다.<sup>(1,2)</sup>

바이오에탄올은 높은 옥탄가와 산소함유(35%)로 불꽃점화방식 엔진의 압축비를 증가시켜 열효율을 증가시킬 수 있으며, CO의 배출량이 낮은 특성을 보이고 있다<sup>(3,4)</sup> 또한, 증발잠열이 높아 흡입공기의 냉각효과를 가져와 엔진의 충전효율을 증대시키는 장점이 있다. 그러나 순수 바이오에탄올 연료만을 기존엔진에 적용시켰을 경우 냉간시동의 문제점을 가지고 있기 때문에 별도의 시동

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부  
 E-mail : cslee@hanyang.ac.kr  
 TEL : (042)869-3045 FAX : (042)869-8207  
 \* 한양대학교 대학원

보조장치를 두거나 에탄올의 부식성에 대한 대응 방안으로 연료필터, 펌프 등에 내부식성 재료를 채택해야 하고 연료중의 에탄올 함량 변화시에 공연비를 보정하기 위한 전자제어장치와 낮은 발열량 문제를 보정하기 위한 전용 인젝터와 가열 산소센서 등을 적용해야 한다. 바이오에탄올 연료는 내 노크성이 기존의 가솔린연료보다 우수하며, 증발잠열이 높아 가솔린연료의 첨가제로도 사용되고 있다. Table 1은 가솔린연료와 에탄올연료의 물성을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 바이오에탄올을 100%(이하 E100)로 하여 불꽃점화엔진에 적용하여 연소 및 배기특성을 가솔린연료의 연소 및 배기특성과 비교 분석하였다. 또한, 에탄올연료 적용에 따른 연소 및 배기 특성을 여러가지 운전조건으로 변화시켜 이들 인자들의 영향을 실험적으로 분석하여 E100의 최적운전조건을 규명하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에 사용된 엔진은 배기량이 1591 cm<sup>3</sup>인 4기통 가솔린엔진을 사용하였으며 주요 제원은 Table 2와 같다.

Fig. 1 과 Fig. 2는 본 실험에 사용된 전자제어 엔진시스템의 개략도와 범용 ECM의 와이어링 다이어그램(Wiring diagram)을 개략화 하여 나타낸 것이다. 실험엔진은 75kW의 EC동력계를 이용하여 엔진속도와 토크를 제어하였으며, 피스톤의 정확한 상사점(이하 TDC)을 검출하기 위하여 크랭크축에 로터리 엔코더를 설치하였다. 연소압력 및

Table 1 Properties of gasoline and ethanol

Characteristic	Gasoline	Ethanol
Chemical formula	C <sub>n</sub> H <sub>1.87n</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH
Molecular weight (kg/kmol)	114.15	46.07
Oxygen (%wt)	12-15	35
Octane Number	86-94	98-100
Density (kg/m <sup>3</sup> at 20°C)	732	792
Latent heat of vaporization (kJ/kg)	289	854
Auto-ignition temperature (°C)	257	423
LHV (MJ/kg)	43.8	26.9
A/F ratio (by volume)	14.7	9.00

열발생율과 같은 연소특성을 파악하기 위하여 압력센서(Kistler, 6051A0)를 점화플러그(Kistler, 6517A)에 장착하였으며, 압력센서의 데이터를 취득하기 위하여 DAQ보드와 LabVIEW 소프트웨어를 사용하여 실시간으로 데이터를 수집하였으며, 솔레노이드 밸브를 이용하여 냉각수온도와 흡입 공기온도를 정해진 실험조건에 맞게 제어하였다. 또한, 흡기압력, 냉각수온도, 스토틀밸브 개도량을 모니터링하고 인젝터, 점화코일, ISA 밸브 등의 엔진 액츄에이터들을 제어하기 위하여 범용 ECM을 실험엔진에 적용하였으며, 램다센서(Bosch, LSU4)와 램다미터(MOTEC, PLM)를 ECM과 연동시켜 정확한 공연비제어를 가능하게 하였다. 그리고 HC, CO, NOX와 같은 배기가스분석을 위해 배기가스분석기를 사용하여 측정하였다.

Table 2 Specifications of the test engine

Description	Specification	
Number of cylinders	4	
Bore×Stroke(mm)	77 × 85.44	
Displacement volume(cm <sup>3</sup> )	1591	
Compression ratio	10.5	
Ignition/injection sequence	1-3-4-2	
Intake valve	Open	BTDC 10°
	close	ABDC 63°
Exhaust valve	Open	BBDC 40°
	close	ATDC 3°
Ignition system	DLI	
Maximum power	89kW at 6200rpm	
Maximum torque	15.6 kgf · m at 4200rpm	

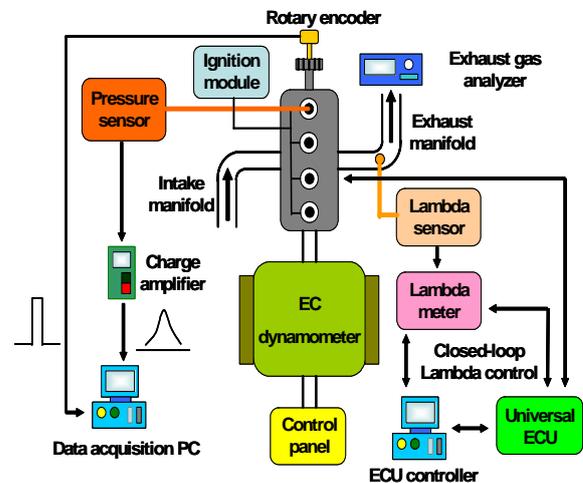
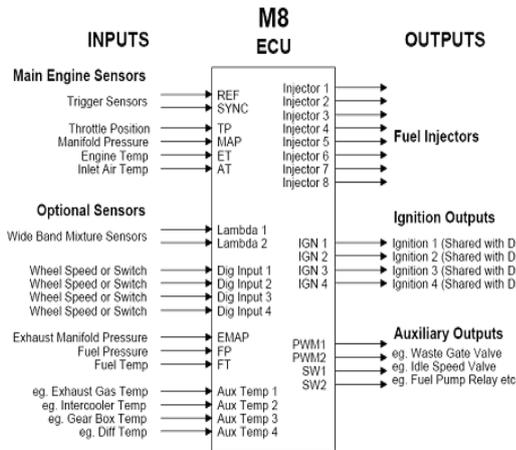


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

**Table 3** Experimental conditions

Item	Experimental condition
Test fuel	Gasoline, E100
Engine speed(rpm)	1500 ~ 3500
Ignition timing (°CA,BTDC)	0 ~ 50
Engine load (TP,%)	0 ~ 100
Intake air temperature (°C)	40
Coolant temperature (°C)	70
Excess air ratio ( $\lambda$ )	0.9, 1

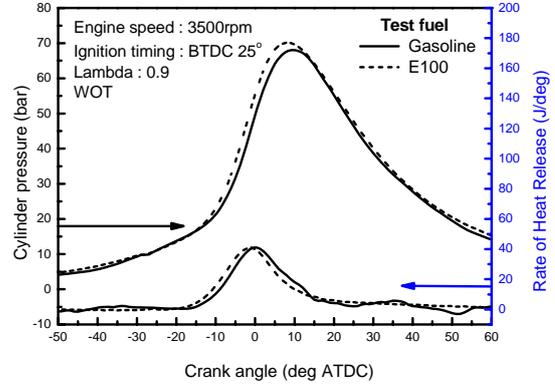


**Fig. 2** Wiring diagram of universal ECM

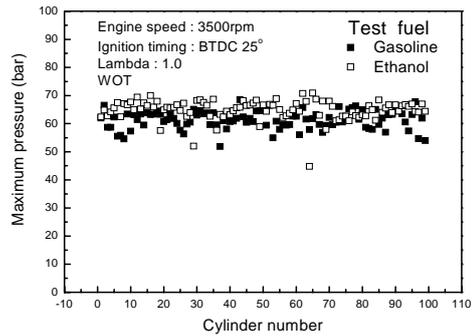
2.2 실험조건 및 방법

실험엔진의 연료와 작동조건에 따른 연소 및 배기특성을 알아보기 위하여 다양한 운전조건들을 변화시켰다. EC 동력계에서 엔진속도를 제어 해주어 스로틀밸브의 개도로 부하를 가하고 그에 따른 토크를 동력계 컨트롤러에서 측정하였으며, 엔진의 회전속도는 1000rpm에서 3500rpm까지 500rpm단계로 실험하였다. 엔진의 시동은 공연비 제어가 불가능한 영역이기 때문에, 원활한 시동을 위해, 상용 ECM의 분사기간, 점화시기, 아이들스피드 밸브(Idle speed valve)의 듀티율(duty ratio), 흡입공기압력 등의 ECM데이터들을 상용 프로그램을 이용하여 취득하여야 하는데, 본 실험에서는, 취득된 데이터들을 범용 ECM에 매핑(mapping)하여 실험엔진의 원활한 시동을 도모하였다. 또한 점화시기를 TDC에서 BTDC 50°까지 변화하여 점화시기가 가솔린과 E100의 연소 및 배기특성에 미치는 영향을 분석하였다. 모든 실험은 흡기온도와 냉각수 온도를 각각 40°C과 70°C로 일정하게 하였으며, 공기과잉률( $\lambda$ )은 부분 부하상태(part load)와 전 부하상태(full load)에 따라

서 1과 0.9로



**Fig. 3** Combustion characteristics of E100 and gasoline fuel



**Fig. 4** Combustion characteristics of E100 and gasoline fuel (Ignition timing = BTDC 25°)

고정하였다. Table 3은 본 연구에 적용된 실험 조건을 나타낸 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 E100의 연소특성

Fig. 3은 MBT에서 E100과 가솔린연료의 연소특성을 알아보기 위하여 엔진속도 3500rpm에서 압력센서로부터 얻은 압력파형과 그에 따른 열발생률을 나타낸 것이다. 전 부하에서의 안정적인 연소를 위하여 공기과잉률을 1.0으로, 점화시기는 BTDC 25°로 제어하였다. E100의 경우 최고 연소압력이 가솔린보다 높았으며, 최고 연소압력 발생시점이 다소 빠르게 나타났다. 그러나, 두 연료사이에 연소특성의 큰 변화는 나타나지 않았다.

Fig. 4는 E100과 가솔린연료의 연소안정성을 비교하기 위해 100회의 엔진 사이클 중의 압력신호

를 추출하여  $P_{max}$  와 사이클과의 관계를 그래프를 나타낸 것이다.

엔진회전속도 2500rpm, 공기과잉률을 1, 전 부하 상태(WOT)에서 점화시기를 BTDC 25°로 제어하여 실험을 수행하였다. 실험결과, 가솔린의 연소최고압력  $P_{max}$  은 에탄올 E100보다 불안정한 연소 압력파형을 나타내었다. 또한 점화시기가 BTDC 20°이하의 지각인 경우, 두 연료간의 연소안정성은 거의 동일한 것으로 나타났으나, BTDC 25°이상으로 점화시기를 진각 시킬 경우, 가솔린연료의 최고 연소압력 부근에서의 압력파형이 급격하게 불안정한 경향을 나타냈으며, 동일 점화시기에서 E100은 가솔린연료에 비하여 현저히 안정된 연소 압력파형을 나타냈다. 이는 높은 옥탄가와 연료의 함산소 특성으로 인한 연소성능 향상으로 인하여 빠른 점화시기에서의 내 노크성(Anti-knock quality) 과 연소안정성이 증가되는 것으로 판단된다.

### 3.2 E100의 엔진성능특성

Fig. 5 과 Fig. 6은 E100과 가솔린연료의 점화시기에 따른 제동토크와 배기온도를 나타낸 것이다. 두 연료 모두 점화시기를 최대토크가 나타나는 점화시기(이하 MBT, Minimum spark advance for best torque) 이상으로 진각 시켰을 때 제동토크가 감소하였으며, MBT시기는 E100과 가솔린연료 모두 BTDC 20°에서 형성되었다. 하지만, 점화시기를 MBT보다 더 진각 시켰을 경우, 가솔린연료는 급격하게 제동토크가 감소되었으나, E100의 경우 제동토크가 가솔린연료에 비해 그 감소량이 적었으며, 점화시기 BTDC 40°에서는 가솔린연료보다 최대 20.1% 높은 제동토크가 발생되었다. 실험의 점화시기 전구간에서 E100의 제동토크는 가솔린 연료보다 높게 나타났으며, 이는 에탄올연료의 증발잠열이 커서 흡입공기의 온도감소로 실린더내에 충전되는 공기량이 많아졌기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 점화시기에 따른 배기가스의 온도를 나타낸 것이며, 온도측정은 배기매니폴드 입구에 설치한 열전대를 통하여 측정하였으며, 점화시기를 TDC에서 BTDC 50°까지 변화시킨 결과, 점화시기가 진각됨에 따라 두 연료 모두 배기가스의 온도가 감소하였다.

이는 점화시기를 지각시킨 경우 연소압력이 일로 전환되지 않고 배기가스로 배출되는 원인과연

소실 벽면으로의 열전달이 감소하는 원인으로

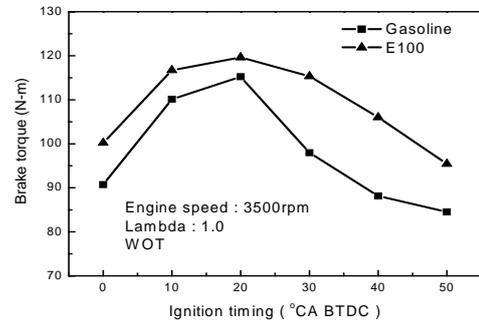


Fig. 5 Effect of ignition timing on brake torque

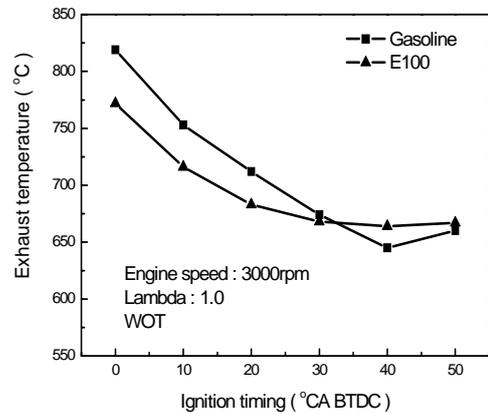


Fig. 6 Effect of ignition timing on exhaust temperature

로 판단된다. 또한, 3000rpm에서 점화시기를 BTDC 20°이상으로 진각 시켰을 때 E100과 가솔린연료 모두 감소하였는데, 이는 점화시기의 지나친 진각으로 연소가스의 열손실의 증가가 크게 기여한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 각 연료의 엔진부하에 대한 제동토크를 나타낸 것이다. 점화시기를 MBT로 고정시키고 엔진속도를 3500rpm으로 제어한 상태에서 스로틀 개도를 100%인 전 부하상태까지 증가시켰다. 실험결과, 스로틀 개도를 40% 증가시킴에 따라 두 연료 모두 제동토크가 급격하게 증가하였으며, 스로틀 개도 30%까지 두 연료의 제동토크가 거의 동일하게 나타났다. 그러나, 스로틀 개도 40% 이상의 개도율에서 100%, 즉 전 부하상태까지의 범위에서는 E100의 제동토크가 가솔린 연료보다 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 8은 두 연료간의 엔진속도에 따른 출력과

제동평균유효압력(BMEP, brake mean effective pressure)특성을 나타내었다. MBT 점화시기와 전 부하 상태 하에서는 실험결과가 두 연료가 동일한 경향을 띄었으나, 3000rpm 이상의 고 회전에서는 E100의 제동출력과 BMEP가 가솔린연료보다 전 영역에서 높게 나타났다.

Fig. 9, Fig. 10은 제동연료소비율(BSFC, Brake specific fuel consumption), 제동에너지소비율(BSEC, Brake specific energy consumption)의 특성을 각각 나타내었다.

E100의 공연비(A/F ratio)는 부피 기준 9.0으로 계산되었으며, 이는 가솔린의 14.7보다 현저히 낮은 수치이다. 가솔린연료기반의 ECM의 연료분사 기간을 수정하지 않고 E100을 엔진에 적용할 경우 나타날 수 있는 공기과잉률의 변화를 방지하기 위하여, ECM제어를 통하여 두 연료의 공기과잉률

을 동일하게 제어하여 분사하였다. 이러한 공연비 제어와 E100의 낮은 발열량으로 인하여 필연적으로 E100의 분사기간이 가솔린 연료보다 증가되었으며, 전 엔진속도범위에서 E100의 연료소비율이 가솔린연료보다 평균 35.7% 증가하였다. 이러한 결과로 인하여, E100은 가솔린연료에 비하여 동일 연료량하의 주행거리가 짧아지며, 연료탱크의 크기가 가솔린연료를 적용할 때 보다 커지게 된다고 판단된다. 하지만, 두 연료는 발열량이 서로 다르기 때문에, (E100, 26.7MJ/kg ; 가솔린, 43.8MJ/kg) 보다 적절한 연소효율을 분석하기 위해서 두 연료의 에너지소비율을 계산하여 Fig. 10에 나타내었다. 실험결과, E100의 제동에너지소비율은 가솔린연료보다 평균18% 감소하였으며, 이와 같이 낮은 E100의 제동에너지소비율은 가솔린 연료보다 열효율이 높다는 것을 의미한다.

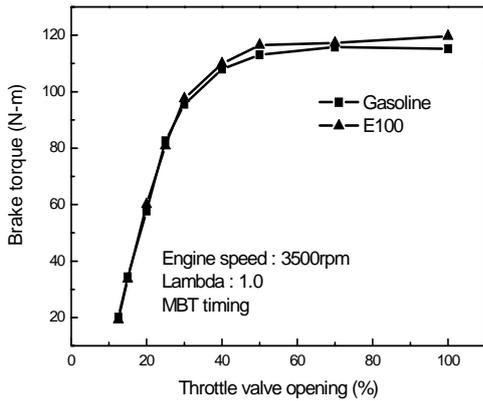


Fig. 7 Effect of throttle valve opening on brake torque

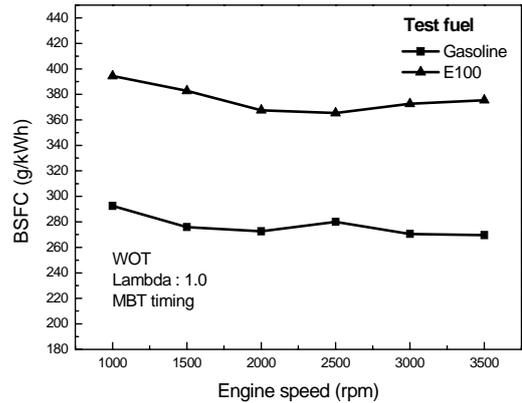


Fig. 9 Effect of engine speed on BSFC

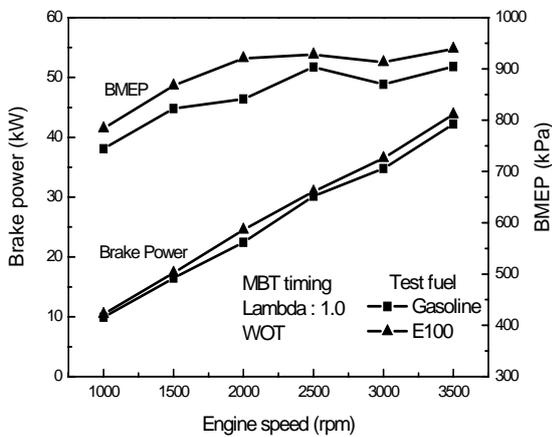


Fig. 8 Effect of engine speed on brake torque

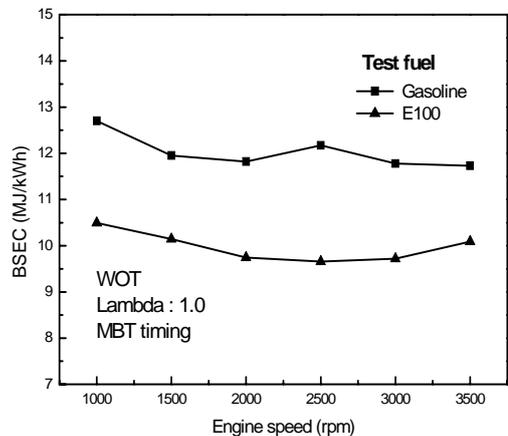


Fig. 10 Effect of engine speed on BSEC

3.3 E100의 배기특성

Fig. 11~13는 점화시기에 따른 E100과 가솔린연료의 배기특성을 나타낸 것이다. EC동력계로 엔진을 1500rpm으로 고정시키고 전 부하 상태에서 공기과잉률 1로 분사시간을 제어하였으며, 삼원촉매를 거치기 전의 배기가스를 측정하였다.

Fig. 11은 HC의 발생량 특성에 관한 그래프로서, 점화시기 구간 TDC에서 BTDC 20°까지 가솔린연료의 배기가스 중 HC의 발생량이 급격히 증가한 반면 E100의 HC 발생량은 점화 시기별로 큰 차이를 보이지 않았다. 점화시기를 TDC까지 지각시킴에 따른 HC의 감소는 배기온도 상승에 의하여, 연소생성물의 산화반응이 활성화되었기 때문으로 판단된다. E100의 경우 점화시기를 진각시킴에 따라 HC 발생량이 미소하게나마 감소하는 경향을 나타냈으며, 가솔린연료에서 BTDC 30°이후로 진각시 HC 발생량이 감소된 것으로 나타난 것은 연소의 불안정성과 HC의 발생 변동량이 크기 때문에 발생평균값으로 나타냈기 때문이다.

Fig. 12는 각 연료에 따른 NOx의 발생량 특성에 관한 그래프로서 NOx는 HC나 CO에 비하여 가솔린연료 대비 감소율이 가장 적었다. 하지만, 점화시기가 TDC까지 지각되면서, 연소개시가 늦어짐에 따라 연소압력이 저하되어 두 연료 모두 NOx가 저감된 것으로 판단된다. E100의 경우, 가솔린연료 대비 NOx 발생량이 현저하게 감소하였다. E100은 가솔린연료보다 낮은 저 발열량과 ECM의 공기과잉률 제어로 인하여 1500rpm 전 부하 상태에서 인젝터 분사시간이 가솔린대비 25% 증가된다. 이와 같이 증가된 분사시간과 E100의 높은 증발잠열로 인하여 흡입행정말 혼합기의 온도가 감소하여 연소온도를 감소시킨 것이 NOx 저감의 주원인으로 판단된다. 이러한 결과는 He et al<sup>(5)</sup>의 에탄올 첨가로 인한 NOx 저감 효과에 대한 실험과도 유사한 경향을 나타내었다.

Fig. 13은 각 연료에 따른 CO의 발생량 특성에 관한 그래프로서 E100의 배기가스 중 CO의 발생량 또한 가솔린연료를 적용할 때 보다 현저히 감소하였다. 본 실험조건과 같은 전 부하 상태에서는 연료중의 에탄올이 낮은 배기가스 온도를 유발시키며, 이로 인하여 가솔린연료보다 현저히 낮은 CO가 발생되는 것으로 알려져 있다.<sup>(6)</sup> 또한, 일반적으로 희박 연소시 CO의 발생량이 감소하는데, 산소를 35% 함유하고 있는 에탄올의 혼합으로 E100의 산소농도가 가솔린연료보다 증가되어 이러한 CO감소효과가 나타났다고 판단된다.

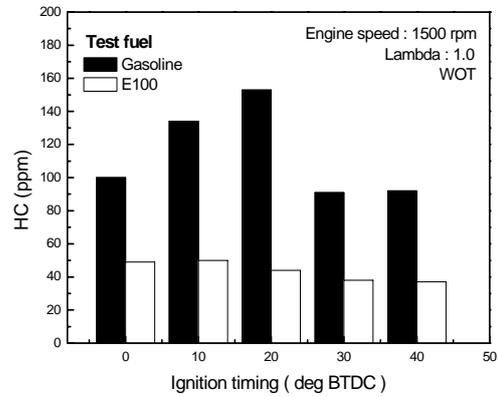


Fig. 11 HC emission characteristics of E100 and gasoline fuel

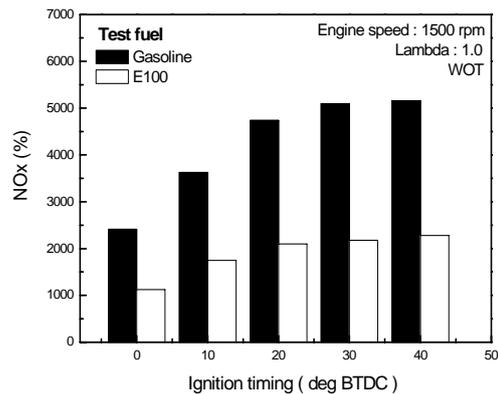


Fig. 12 NOx emission characteristics of E100 and gasoline fuel

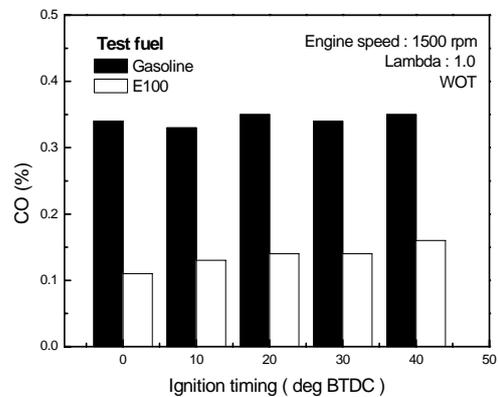


Fig. 13 CO emission characteristics of E100 and gasoline fuel

#### 4. 결 론

E100과 가솔린에 따른 엔진성능 및 연소와 배출물 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) E100의 연소압력은 가솔린연료보다 MBT 점화시기 부근을 제외한 점화시기에서 가솔린연료의 연소압력보다 동일하거나 높은 것으로 나타났다. 3500rpm과 같은 빠른 엔진회전속도에서 BTDC 25°까지 점화시기를 진각 시킬수록 E100의 연소는 가솔린 연료보다 현저히 향상되었다. 이는 가솔린연료보다 약 13% 높은 E100의 높은 옥탄가에 기인하는 것으로 판단된다.

(2) E100의 경우 점화시기 진각에 따른 제동토크 감소가 가솔린연료에 비해 적었으며, 가솔린연료보다 높은 제동토크가 형성되었다.

(3) E100과 가솔린연료 모두 스로틀 개도율을 증가시키기에 따라 모두 제동토크가 급격하게 증가하였으며, 스로틀 개도율 30%까지 두 연료의 제동토크가 거의 동일하게 나타났으며 스로틀 개도 40%이상의 개도율에서 전 부하상태까지의 범위에서는 E100의 제동토크가 가솔린 연료보다 우수한 것으로 나타났다.

(4) E100과 가솔린연료의 연소안정성 비교를 위하여 두 연료의 100 싸이클의 연소압력 파형을 분석한 결과, 2500rpm이상의 높은 엔진회전속도에서 점화시기를 진각 시킬 경우, E100의 연소안정성이 가솔린연료 보다 우수한 것으로 나타났다.

(5) 점화시기를 지각시킴에 따라 E100의 HC, NOx 및 CO의 발생량은 가솔린 연료에 비하여 현저하게 감소하였다.

#### 후 기

본 연구는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부

의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원사업과 환경부 Eco-STAR project (무·저공해자동차사업단) 및 한국과학재단 특정기초연구(R01 - 2006-000-10932-0)의 지원으로 수행되었으며, 연구를 지원하여 주신 관계기관에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Cho, J. M. and Lee, C. S., 2003. "Emission Characteristics of a Gasoline Engine Using Ethanol Blended Fuel," *Fall Conference of KSAE*, pp. 458~463.
- (2) M.Al-Hasan, 2003. "Effect of Ethanol-Unleaded Gasoline Blends on Engine Performance and Exhaust Emission," *Energy Conversion & Management*, Vol. 44, pp. 1547~1561.
- (3) Al-Farayedhi, 2004. A. A., Al-Dawood, A. M. and Gandhidasan, P., "Experimental Investigation of SI Engine Performance Using Oxygenated Fuel," *Transaction of the ASME*, Vol. 126, pp. 178~191.
- (4) Pouloupoulos, S. G. and Philippopoulos, C. J., 2003. "The Effect of Adding Oxygenated Compounds to Gasoline on Automotive Exhaust Emissions," *Transaction of the ASME*, Vol. 125, pp. 344~350.
- (5) He, B. Q., Wang, J. X., Hao, J. M. Yang, X. G. and Xiao, J. H., 2003. "A Study on Emission Characteristics of an EFI Engine with Ethanol Blended Gasoline Fuels," *Atmospheric Environment*, Vol. 37, pp. 949~957.
- (6) 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
- (7) John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill.