



합산소기재가 MPI 및 GDi 차량의 배출가스 및 연비에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

송호영^{1,3)} · 김기호¹⁾ · 임태윤²⁾ · 김홍집^{*3)}

한국석유관리원 석유기술연구소¹⁾ · 현대오일뱅크 연구소²⁾ · 충남대학교 기계공학과³⁾

The Experimental Study of the Effect of Oxygenates on Exhaust Emissions and Fuel Economy of MPI and GDi Vehicles

Hoyoung Song^{1,3)} · Kiho Kim¹⁾ · Tae-yoon Lim²⁾ · Hongjip Kim^{*3)}

¹⁾Research Institute of Petroleum Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority, 33 Yangcheong 3-gil, Ochang-eup, Cheongwon-gu, Cheongju-si, Chungbuk 28115, Korea

²⁾Lubricants R&D Institute, Hyundai Oilbank, 17-10 Mabuk-ro, 240beon-gil, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 16891, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

(Received 5 June 2017 / Revised 10 July 2017 / Accepted 26 July 2017)

Abstract : In this study, the effects of various oxygenates for gasoline on exhaust emissions and fuel economy in MPI and GDi vehicles were investigated. Various oxygenates such as MTBE, TAME, ETBE, Bio-ethanol were selected. Oxygenate blend fuels that oxygenate were added in suboctane have about 2.3 wt % of oxygen content. FTP-75 mode and HWFET mode, which are widely used in Republic of Korea and the US to test fuel economy, were applied to investigate exhaust emissions from the test vehicles. Gaseous emissions such as CO, NMHC and NOx did not show any significant correlation with oxygenates, although a slight difference between oxygenate blend fuels and suboctane as a base fuel was observed. The combined fuel economy of a blend fuel having MTBE increased 0.3 % in an MPI vehicle and 1.3 % in a GDi vehicle, but that of other fuels decreased. In particular, the combined fuel economy of a blend fuel with bio-ethanol decreased 2.7 % in an MPI vehicle and 1.6 % in a GDi vehicle. The particle number concentration of oxygenate blend fuels was less than that of suboctane, but the difference between oxygenate blend fuels was slight in FTP-75 mode. In HWFET mode, the particle number concentration has a very similar tendency in MPI and GDi vehicles. When compared with each of the oxygenate blend fuels, the particle number concentration of a TAME blend fuel was highest while that of bio-ethanol was lowest.

Key words : Oxygenate(합산소기재), MTBE(Methyl Tert-Butyl Ether), TAME(Tertiary Amyl Methyl Ether), ETBE(Ethyl Tertiary-Butyl Ether), Bio-Ethanol(바이오에탄올), Combined fuel economy(복합연비), Particle number concentration(입자개수), PM(Particulate Matter, 입자상물질)

1. 서론

합산소기재는 휘발유의 옥탄가를 향상시키기 위해 첨가되는 대표적인 첨가제이다. 합산소기재중 옥탄가 향상 효과가 큰 MTBE(Methyl Tert-Butyl

Ether)가 널리 사용되고 있다. 하지만 친수성이 강해 수질을 오염시키는 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 일부 국가나 지역에서는 MTBE의 사용을 규제하고 있다. Bio-Ethanol은 온실가스 저감효과가 크고 옥탄가를 향상시키는 기능도 있어 최근에 미국을 중심으로 사용량이 증가하고 있다. 이와 더불어

*Corresponding author, E-mail: khongjip@cnu.ac.kr

혼합 비율을 높이기 위한 많은 연구들이 이루어지고 있다. 이외에도 TAME(Tertiary Amyl Methyl Ether), ETBE(Ethyl Tertiary-Butyl Ether) 등과 같은 합산소기제에 대한 연구들도 이루어지고 있다.

Poulopoulos와 Philippopoulos¹⁾는 4기통 엔진에서 0.0 ~ 11.0 %의 MTBE를 함유한 연료로 연구를 수행하였다. MTBE의 첨가는 고부하 영역에서 CO, HC의 배출량을 감소시켰다. 하지만 냉간시동 조건에서는 MTBE 함량이 증가함에 따라 MTBE, HC, CO의 배출량이 증가하는 결과를 보였다. Yinhui 등²⁾은 Direct Injection Gasoline 엔진에서 Aromatics, Olefin, Sulfur, Methyl-cyclopentadienyl Manganese Tricarbonyl (MMT), Ethanol의 함량이 다른 6종의 연료를 대상으로 연구를 수행하였다. 연구결과에 따르면 방향족 화합물(Aromatics)의 함량을 높이면 입자상물질(PM)과 입자개수(PN)의 배출량이 증가하고 PAH의 배출량도 증가하는 결과를 보였다. 올레핀(Olefin) 함량을 감소시키면 고부하영역에서 어느 정도 PM과 PN을 감소시키는 것으로 나타났다. Ethanol을 10% 함유한 연료는 Aromatics와 Olefin을 감소시킨 연료와 비교해서 PM의 제한된 개선을 보였다. Schifter 등³⁾의 연구결과에 따르면 MTBE 함량이 높은 경우 일반적인 함량(11 vol %)보다 느리게 연소하였다. 그리고 MTBE 함량이 증가함에 따라 연비는 감소하는 것으로 발표하였다. 또한, MTBE 함량이 최고 51 vol %까지는 부정적인 영향은 없었고 MTBE 함량이 증가함에 따라 NOx가 조금 감소하는 결과를 보였다. Khosousi 등⁴⁾은 Laminar coflow diffusion flames에서 Gasoline에 Ethanol 첨가가 Soot 형성에 미치는 영향을 연구하였다. 실험과 수치 모델링 결과를 통해 Ethanol을 첨가할수록 Soot loading은 감소함을 밝혔다. JRC Scientific and policy reports에서는 EURO 4를 만족하는 차량 3대로 NEDC mode, SFTP mode, Constant speed test 조건에서 합산소기제가 연비, 규제배출가스, PM 배출 특성에 미치는 영향을 연구하였다. 이 보고서에 따르면 휘발유에 합산소기제를 첨가하면 산소함량에 비례하여 저위발열량이 감소하였다. 또한, 연비는 저위발열량이 감소할수록 악화되는 결과를 보였다. 즉 합산소기제로 인한 더 나은 엔진효율을 통해 연료의 낮은 발열량을 보상할

수 없다는 사실을 확인하였다. RON, 산소함량, 합산소기제의 종류를 변화시켰음에도 불구하고 CO, THC, NOx에는 큰 영향이 없었다. 이러한 결과는 Driving cycle과 차량기술이 연료물성보다 더 크게 영향을 미쳤기 때문인 것으로 보고하였다. PM과 PN도 연료물성보다 Driving cycle과 차량 기술의 영향이 큰 것으로 보고하였다.⁵⁾

합산소기제 중 MTBE를 휘발유에 첨가하면 증류성상은 감소하고 옥탄가는 증가하는 것으로 알려져 있다.^{6,7)} 그리고 오창훈과 차규섭⁸⁾의 연구에 따르면 MTBE의 함량을 증가시킬 경우, 연비나 배출가스의 악영향 없이 PN을 감소시키는 것으로 보고되었다. Topgul⁹⁾의 연구에서는 단기통 엔진에서 MTBE 함량별(0, 5, 10, 20 and 30 vol %)로 엔진 성능과 배출가스를 연구하였다. MTBE의 낮은 발열량으로 인해 MTBE 10 vol % 이상의 함량에서는 BSFC(Brake Specific Fuel Consumption)가 감소하는 결과를 보였다. 그리고 CO와 HC 배출량은 MTBE 30 vol %에서 가장 적었다. 반면 NO 배출량은 30 vol %가 평균 23.8 % 높았다. CH₄-O₂ 연소에서 O₂ 농도가 증가할 경우, 화염의 단열화염온도는 증가하므로 화염온도가 올라가 결국 화염속도도 빨라지는 것으로 알려져 있다.¹⁰⁻¹²⁾ 그리고 Curran 등¹³⁾은 Shock tube 실험에서 MTBE 함량이 증가하는 경우 화염속도가 빨라진다는 결과를 제시하였다.

기존 연구는 주로 합산소기제나 산소를 함유한 연료의 연소특성이나 배출물에 집중되었지만 본 연구에서는 휘발유에 첨가되어 사용될 수 있는 합산소기제(MTBE, ETBE, TAME, Bio-Ethanol)를 다양하게 제시하고 동일한 산소함량일 때 휘발유 차량에서 배출되는 가스상물질, 입자상물질 그리고 연비에 대해서 시험·분석하였다.

2. 시험장치 및 방법

2.1 시험용 차량

본 연구에서는 시험용 차량으로 MPI(Multi Point Injection) 방식과 GDi(Gasoline Direct Injection) 방식의 휘발유 차량을 각 1대씩 사용하였다. 세부적인 제원은 Table 1에 나타내었다. 차량의 주행거리는 약 3만에서 약 6만 km이며 시험용 차량의 적합성은

Table 1 Specifications of test vehicles

Injection type	MPI	GDI
Displacement (cc)	1,999	2,359
Cylinder×bore×stroke (No.×mm×mm)	4×81×97	4×88×97
Compress ratio	10.3 : 1	11.3 : 1
Max. power (ps/rpm)	172/6700	201/6300
Max torque (kg·m/rpm)	20.5/4800	25.5/4250
Model year	2013	2012
Mileage (km)	30,000	56,000

Table 2 Regulated emissions and FE of test vehicles

Vehicles	Emissions (g/km)			
	CO	NMHC	NOx	FE
MPI	0.223	0.013	0.012	11.9(11.9)*
GDi	0.433	0.013	0.006	11.5(11.3)*
Regulation	1.31	0.034	0.044	-

* Certificated fuel economy

시중에 유통되는 보통 휘발유를 사용하여 검증하였다. 검증결과(Table 2), 배출가스 인증기준에 적합하였으며 공인연비와 약 2% 이내의 차이를 보였다.

2.2 시험용 연료 및 물성평가 방법

본 연구에서는 정유사에서 휘발유 제조시 사용되는 반제품인 Suboctane을 Base로 사용하였다. 4개의 합산소기체를 Suboctane에 첨가하여 산소함량을 2.3 wt %로 동일하게 제조하였다. 시험용 연료는 한국산업규격 KS M 2612:2012 ‘자동차용 휘발유’방법에 의거하여 분석하였다. 그리고 품질기준에 없는 항목은 별도의 국내외 시험방법을 적용하였으며 분석항목 및 시험방법은 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Test methods for fuels

Items	Method
Octane number (RON)	ASTM D 2699
Distillation (°C)	ASTM D 86
Vapor pressure (37.8 °C, kPa)	KS M 2692
Sulfur content (mg/kg)	ASTM D 5453
Aromatic content (vol %)	ASTM D 6839
Benzene content (vol %)	ASTM D 6839
Olefin content (vol %)	ASTM D 6839
Oxygen content (wt %)	ASTM D 6839
Net heating value	KS M 2057
Element analysis (wt %)	ASTM D 5291
Density (g/cm ³)	KS M 12185

2.3 배출가스 시험장치 및 시험방법

배출가스를 측정하기 위해서 MIM 방식(Single roll 48 inch) 차대동력계(B.E.P. M4500)와 배출가스 분석기(HORIBA MEXA-7200H)를 사용하였다(Fig. 1). PN 측정은 국내외에서 인증시험시 사용되며 23 nm에서 2.5 μm의 미세입자(Fine particle)를 정밀하게 측정할 수 있는 TSI社의 CPC 3790을 사용하였다. 일산화탄소(CO) 및 이산화탄소(CO₂)는 비분산적외선 분석법(NDIR, Nondispersive Infrared Detection), 탄화수소(HC)는 열식불꽃이온화검출기법(HFID, Heated Flame Ionization Detection), 질소산화물(NOx)은 화학발광법(CLD, Chemiluminescence Detection), CH₄는 GC-FID(Gas Chromatography-FID)를 적용하였다.

차량의 배출가스는 국내 및 미국 EPA에서 휘발유 차량의 연비 및 배출가스 시험방법인 FTP-75 mode(Fig. 2(a))와 HWFET mode(Fig. 2(b))를 적용하였다. 연비(FE, Fuel economy)는 「자동차의 에너지 소비효율, 온실가스배출량 및 연료소비율 시험방법 등에 관한 고시」 별표 10의 휘발유 자동차 산정방법(Carbon balance method)과 5-cycle 보정식에 의한 복합에너지소비효율(복합연비, Combined fuel economy) 산출 방식을 적용하였다.

FTP-75 mode는 총 3개의 Phase와 1개의 엔진 정지구간으로 구성되어 있다. Phase-1은 Cold start 상태(25 ± 5 °C, 50 ± 20 RH %)이며 Phase-2는 가감속구간(Transient cycle)이다. Phase-3는 Phase-1과 Phase-2를 연속주행한 후 약 10분간 엔진을 정지시켰다 다시 주행하는 조건으로 Hot start 조건이며 Phase-1과 동일한 속도분포를 가진다. HWFET Mode의 속도분포는 Fig. 2(b)와 같으며 동일한 Cycle로 예열후 연속적으로 본 시험을 진행한다. 시험이 수행되는 동안 온도와 습도는 각각 25 ± 2 °C, 50 ± 5 RH %의 상태로 유지되었다.

식 (1)은 연료의 물성(CWF, SG, NHV)을 반영한 연비계산식이며 식 (2)와 (3)은 FTP-75 mode와 HWFET mode의 5-cycle 연비 보정식이다. FTP는 FTP-75 mode의 연비, HWFET는 HWFET mode의 연비이다. 식 (4)는 식 (2)와 (3)에 의해 보정된 값을 이용한 복합연비 계산식이다.

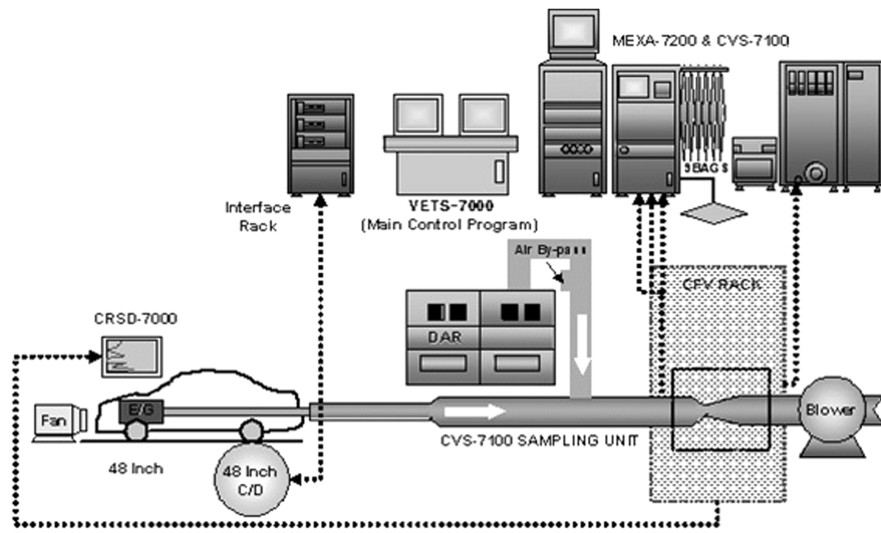


Fig. 1 The schematic of chassis dynamometer

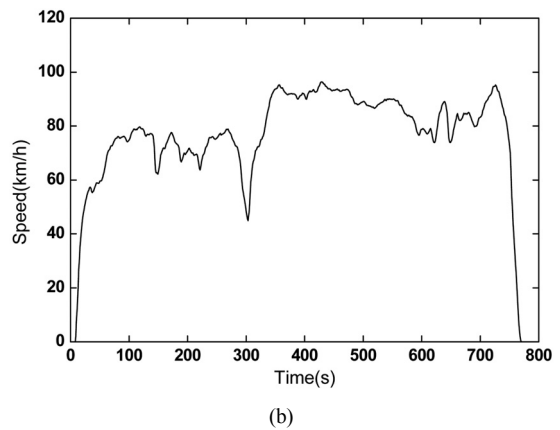
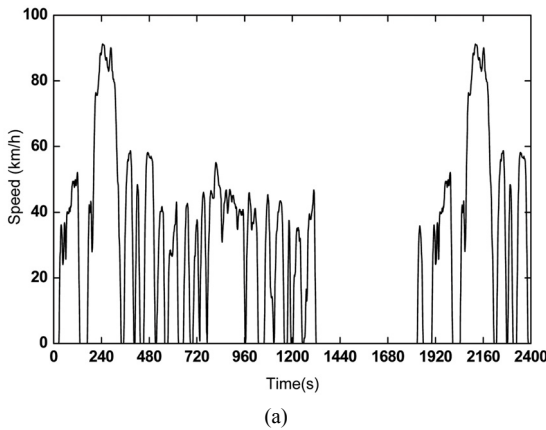


Fig. 2 Test modes : (a) FTP-75 mode, (b) HWFET mode

$$FE(km/L) = \frac{3,179 \times 10^4 \times CWF \times SG}{[(CWF \times HC + 0.429 \times CO + 0.273 \times CO_2) \times (0.6 \times SG \times NHV + 12,722)]}$$

- 1) HC, CO, CO₂: carbon exhaust emission(g/km)
- 2) CWF: Carbon Weight Fraction
- 3) SG: Specific Gravity(g/ml)
- 4) NHV: Heating Value(J/g)

$$FTP'(km/L) = 1/(0.007639 + 1.1886/FTP)$$

$$HWFET'(km/L) = 1/(0.004425 + 1.3425/HWFET)$$

$$Combined.FE(km/L) = 1/(0.55/FTP' + 0.45/HWFET')$$

2.4 시험용 연료 물성 평가 결과

Table 4와 같이 함산소기재를 혼합한 연료의 순발

열량(Net heating value)은 함산소기재의 순발열량이 Suboctane보다 상대적으로 낮아 함산소기재를 첨가한 연료에서 낮게 나타났다. 그중 MTBE 혼합연료의 순발열량이 가장 낮고 다른 3종의 순발열량은 비슷한 수준이었다. 그리고 체적단위로 환산한 결과에서도 Suboctane과 비교해서 MTBE -3.0 %, TAME -1.2 %, ETBE -1.3 %, Bio-Ethanol -0.8 %로 Suboctane보다 낮았다. 밀도(Density)는 함산소기재를 첨가했을 때 모두 증가하는 결과를 보였고 함산소기재 혼합연료간에 큰 차이는 없었다. 증류성상(Distillation) 결과에서는 증발특성이 우수한 Bio-Ethanol을 첨가하였을 때 T10과 T50이 감소하였다. 반면 MTBE,

Table 4 Properties of test fuels

Items		Specification	Suboctane	MTBE 2.3	TAME 2.3	ETBE 2.3	Bio-Ethanol
Octane number (RON)		91 ~ 94	89.2	92.7	93.1	93.4	91.3
Distillation (°C)	T10	≤ 70	53.9	53.0	56.3	55.9	49.2
	T50	≤ 125	79.0	72.8	78.0	77.8	75.1
	T90	≤ 170	116.1	112.2	110.0	113.7	114.0
	End point	≤ 225	192.7	181.2	171.0	179.9	183.4
	Residue (vol %)	≤ 2.0	0.9	0.9	1.0	0.5	1.5
Vapor pressure (37.8 °C, kPa)		44 ~ 82	58.1	58.8	55.4	56.2	62.8
Sulfur content (mg/kg)		≤ 10	3	3	4	4	3
Aromatic content (vol %)		≤ 24(21)	2.5	2.2	1.9	2.0	2.3
Benzene content (vol %)		≤ 0.7	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5
Olefin content (vol %)		≤ 16(19)	12.7	11.1	15.3	11.5	12.2
Oxygen content (wt %)		≤ 2.3	0.15	2.34	2.38	2.32	2.38
Net heating value	MJ/kg	*	47.4544	45.6855	46.4030	46.3630	46.5445
	MJ/m ³	*	33.2655	32.2540	32.8533	32.8250	33.0001
Element analysis (wt %)	C	*	84.53	83.47	82.27	82.28	82.18
	H	*	15.31	14.89	15.42	15.41	15.51
Density (g/cm ³)		*	0.701	0.706	0.708	0.708	0.709

*No specification

TAME, ETBE의 T10은 동일하거나 조금 증가하는 결과를 보였다. 그리고 T50은 Suboctane과 비교해서 MTBE가 가장 많이 감소(-4.2 °C)했으며 다음으로 Bio-Ethanol의 감소폭이 컸다(-3.9 °C). ETBE와 TAME는 Suboctane보다 약 1 °C 낮았다. 이러한 증류성상 결과는 증기압(Vapor pressure)에서도 확인할 수 있다. T10과 T50이 낮은 Bio-Ethanol의 증기압이 62.8 kPa로 가장 높았으며 T10이 높은 TAME의 증기압이 55.4 kPa로 가장 낮았다. 옥탄가(RON)는 Suboctane보다 모두 높았으며 MTBE, ETBE, TAME는 오차범위이내의 동등한 수준이며 Bio-Ethanol은 상대적으로 낮았다. Aromatics 함량은 합산소기재 첨가에 따라 감소하였으며 합산소기재간 차이는 미미하였다. Olefin 함량은 MTBE, ETBE, Bio-Ethanol을 첨가하였을 때는 감소하였다. 이는 3가지 합산소기재의 순도가 95 % 이상으로 높고 olefin을 함유하고 있지 않기 때문이다. 반면, 순도가 낮고 올레핀 성분을 함유하고 있는 TAME(순도 약 65 %)를 첨가했을 때 혼합연료의 올레핀 함량은 증가하였다.

3. 연구결과

3.1 가스상 배출가스 결과

FTP-75 mode와 HWFET mode의 CO 배출량을

Fig. 3에 나타내었다. 그리고 NMHC 배출량과 NOx 배출량은 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다.

연료의 옥탄가 증가는 연료의 미연소를 감소시켜 CO와 HC를 감소시키고 NOx를 증가시킨다.¹⁴⁾ 그리고 연료의 발열량 감소는 화염온도를 감소시키고 Thermal NOx의 발생량을 감소시킨다. 합산소기재를 첨가한 경우 옥탄가는 증가하고 발열량은 감소하였다. 이 경우 CO, HC 배출량은 감소해야 하지만 실험에서는 증가하거나 감소하는 결과를 보였으며 차이는 미미하였다. 이는 차량의 삼원촉매에 의해 이러한 일반적인 배출경향이 상쇄되고 삼원촉매의 활성화 온도 등의 영향을 받았기 때문이다. NOx 배출량은 연료간 미미한 차이를 보였다. 이는 옥탄가 증가로 인해 NOx가 증가하는 요인과 발열량 감소로 인해 감소하는 요인을 모두 가지고 있어 연료에 기인한 NOx의 영향은 상쇄되었기 때문이다.

3.2 연비시험결과

Fig. 6의 연비시험결과는 식 (1)을 적용하여 자동차의 물성을 반영한 결과이며 Table 5는 식 (4)를 적용하여 복합연비를 산출하고 Suboctane의 복합연비와 비교한 결과이다. Fig. 6은 MPI 차량과 GDi 차량에서 FTP-75 mode와 HWFET mode의 연비결과이다.

합산소기제가 MPI 및 GDi 차량의 배출가스 및 연비에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

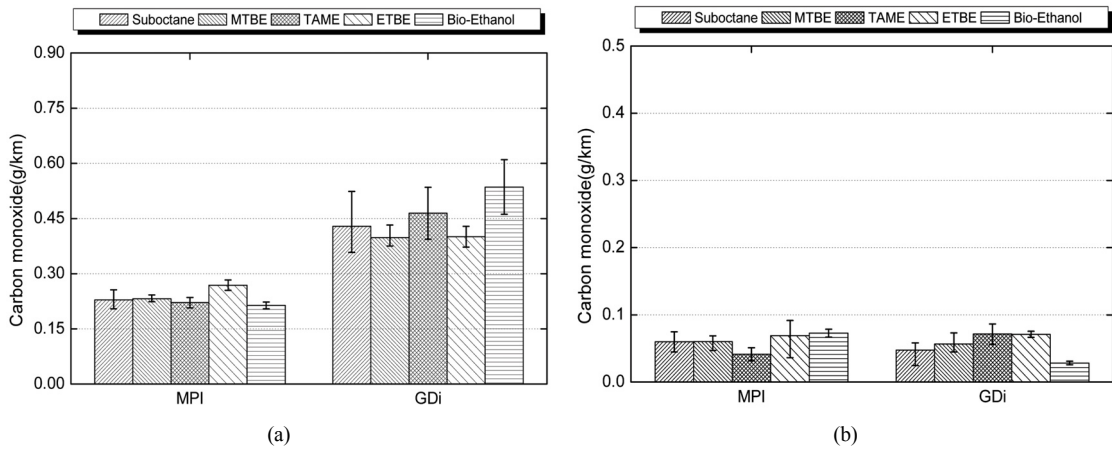


Fig. 3 The results of CO : (a) FTP-75 mode, (b) HWFET mode

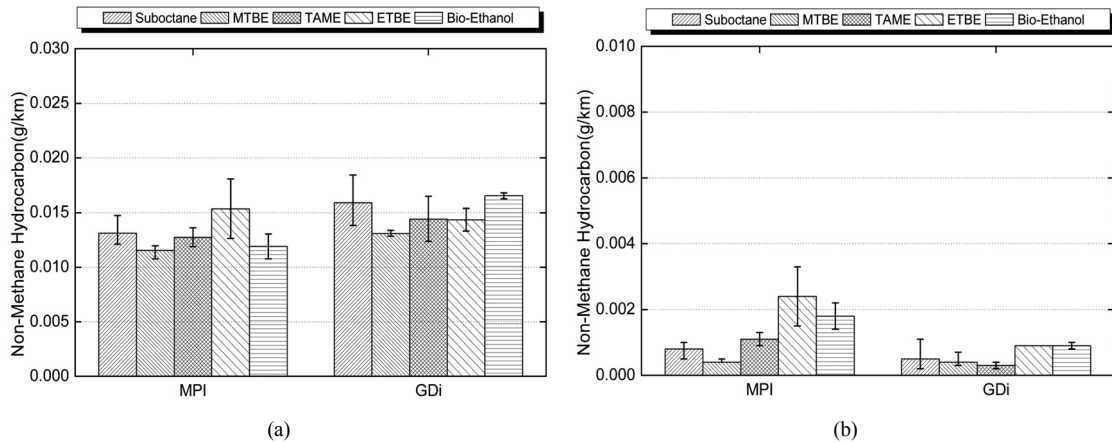


Fig. 4 The results of NMHC : (a) FTP-75 mode, (b) HWFET mode

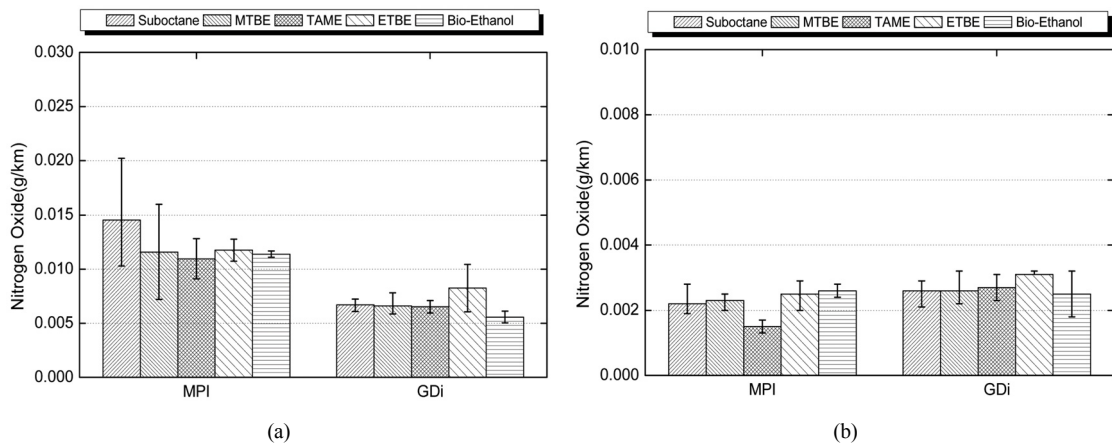


Fig. 5 The results of NOx : (a) FTP-75 mode, (b) HWFET mode

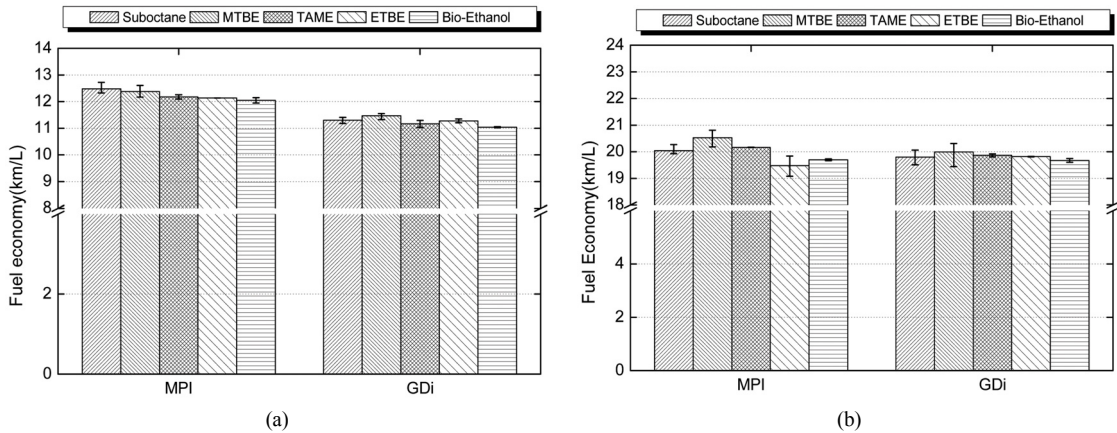


Fig. 6 The results of Fuel economy : (a) FTP-75 mode, (b) HWFET mode

Table 5 Reduction ratio of fuel economy on FTP-75 mode and HWFET mode and combined fuel economy compared to Suboctane

Vehicle \ Fuels		MTBE	TAME	ETBE	Bio-E
MPI (%)	FTP-75	-0.8	-2.5	-2.8	-3.5
	HWFET	2.4	0.6	-2.8	-1.7
	Combined	0.3	-1.3	-2.6	-2.7
GDi (%)	FTP-75	1.6	-1.2	-0.2	-2.3
	HWFET	1.0	0.3	0.1	-0.6
	Combined	1.3	-0.6	-0.1	-1.6

오차막대는 최대값과 최소값을 의미한다.

FTP-75 mode에서 MPI 차량에 합산소기재를 첨가했을 경우, 연비는 감소하는 결과를 보였다. GDi 차량에서는 Suboctane의 연비와 비교해서 MTBE를 첨가한 연료는 높고 다른 합산소기재는 모두 낮았다. 합산소기재를 첨가함에 따라 옥탄가는 증가하고 발열량은 감소하였다. 옥탄가 증가는 국부적인 Knocking을 감소시켜 연비를 증가시키는 효과가 있다. 반면 발열량이 감소하면 연비는 감소한다. FTP-75 mode의 결과는 합산소기재 혼합연료의 발열량 감소로 인해 연비가 전반적으로 감소한 것으로 보인다. 그러나 MTBE를 첨가했을 때 연비가 증가한 것은 옥탄가 및 발열량의 영향과 더불어 연료의 증발 특성이 좋아졌기 때문인 것으로 판단된다. 즉, T50이 낮아 연료를 분사한 후 증발량이 증가하고 확산에 의해 균일한 혼합기가 형성되어 연소효율이 개선된 것으로 보인다. 이러한 영향은 연료와 공기가 희석되는 시간이 긴 Port fuel injection보다 희석 시간이 짧은 직접 분사 방식의 엔진에서 두드러지게 나타났다.

Bio-Ethanol을 혼합한 연료는 모든 시험조건에서 연비가 가장 낮게 나타났다. 이는 상대적으로 옥탄가가 낮고 발열량이 감소한 영향인 것으로 보인다. 그리고 ETBE와 TAME는 옥탄가 증가와 발열량 감소의 영향으로 연비가 미미하게 감소하였다.

HWFET mode에서도 MTBE를 혼합한 연료의 연비가 높게 나타났으며 Bio-Ethanol의 연비가 가장 낮게 나타났다. 이는 옥탄가, 발열량, T50이 복합적으로 작용했기 때문이다.

3.3 입자개수(PN) 시험결과

Fig. 7은 FTP-75 mode에서 각 Phase별 PN 배출량과 FTP-75 mode 전체 PN 배출량을 나타낸 그래프이다. 오차막대는 최대값과 최소값을 의미한다. Table 6은 Suboctane의 PN 배출량과 합산소기재의 PN 배출량을 비교한 결과이다.

MPI 차량과 GDi 차량에서 합산소기재 혼합연료의 PN 배출량은 Suboctane보다 적었다. 이는 다음과 같은 원인 때문이다. 첫째 입자상물질(PM)을 구성

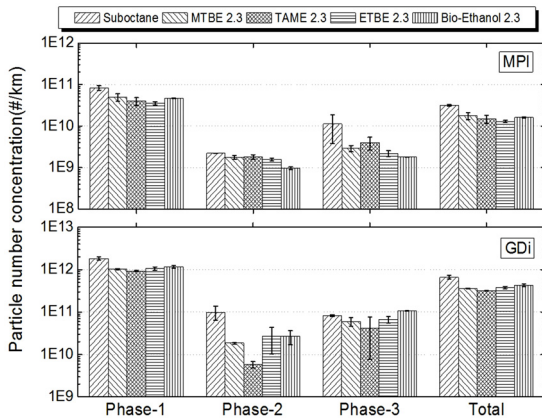


Fig. 7 The results of particle number concentration on FTP-75 mode by phases

Table 6 Reduction ratio of particle number on FTP-75 mode compared to Suboctane

Vehicle	Fuels				
	MTBE	TAME	ETBE	Bio-E	
MPI (%)	-44.0	-53.1	-59.3	-49.3	
GDi (%)	-45.1	-51.2	-42.5	-34.9	

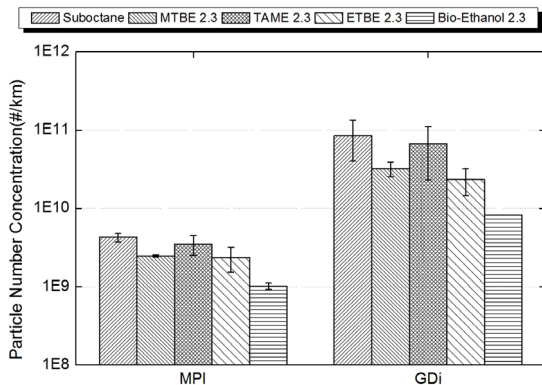


Fig. 8 The results of particle number concentration on HWFET mode

Table 7 Reduction ratio of particle number concentration on HWFET mode compared to Suboctane

Vehicle	Fuels				
	MTBE	TAME	ETBE	Bio-E	
MPI (%)	-42.1	-17.7	-44.4	-76.1	
GDi (%)	-62.1	-21.8	-72.6	-90.4	

하는 주요성분은 탄소이다. 합산소기재를 첨가함에 따라 연료중 탄소성분이 감소하여 PM의 전구체가

감소하고 결국, PN 배출량이 감소했기 때문이다. 둘째, 옥탄가가 증가하여 국부적으로 발생하는 Knocking이 감소하고 불완전 연소가 감소하여 PN 배출량이 감소한 것이다. 마지막으로 연료중 방향족 함량이 감소하여 PN 배출량이 감소하였다.

HWFET mode의 PN 배출량(Fig. 8, Table 7) 결과에서도 합산소기재를 혼합한 연료의 PN 배출량이 적은 것으로 나타났다. FTP-75 mode에서는 합산소기재별로 PN 배출량의 차이가 미미하였다. 하지만 HWFET mode에서는 TAME를 함유한 연료의 PN 배출량이 높았다. 이는 TAME가 다른 합산소기재보다 많은 올레핀을 함유하고 있기 때문이다.²⁾

4. 결론

휘발유에 첨가되는 합산소기재(MTBE, TAME, ETBE, Bio-Ethanol)의 종류에 따른 휘발유 차량에서 배출되는 CO, NMHC, NOx, PN과 연비를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 합산소기재 첨가에 따른 CO, NMHC, NOx의 영향은 매우 미미하다는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) MTBE를 첨가한 경우 저위발열량이 감소했음에도 불구하고 옥탄가가 증가와 T50 감소의 영향으로 연비가 0.3 %에서 1.3 % 개선되었다. 반면, Bio-Ethanol은 상대적으로 낮은 옥탄가와 낮은 발열량의 영향으로 연비가 1.6 %에서 2.7 % 감소하였다. TAME와 ETBE는 높은 옥탄가와 낮은 발열량으로 인해 미미한 연비 감소를 보였다.
- 3) 옥탄가가 증가, 방향족 함량 감소 등의 영향으로 합산소기재를 첨가한 연료의 PN 배출량은 감소하였다. 그리고 FTP-75 mode에서는 합산소기재를 혼합한 연료간 PN 배출량은 차이가 없었다. 하지만 HWFET mode에서는 올레핀 함량이 높은 TAME의 PN 배출량이 다른 합산소기재를 첨가한 연료보다 높음을 확인할 수 있었다.
- 4) 합산소기재 중 가장 일반적으로 사용되고 있는 MTBE는 연비를 증가시키고 PN 배출량은 감소시키는 결과를 보였다. 반면 최근 사용량이 증가하고 있는 Bio-Ethanol은 PN 배출량을 감소시키는 효과는 있었지만 연비에 악영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

References

- 1) S. Pouloupoulos and C. Philippopoulos, "Influence of MTBE Addition into Gasoline on Automotive Exhaust Emissions," *Atmospheric Environment*, Vol.34, pp.4781-4786, 2000.
- 2) W. Yinhui, Z. Rong, Q. Yanghong, P. Jianfei, L. Mengren, L. Jianrong, W. Yusheng, H. Min and S. Shijin, "The Impact of Fuel Compositions on the Particulate Emissions of Direct Injection Gasoline Engine," *Fuel*, Vol.166, pp.543-552, 2016.
- 3) I. Schifter, U. Gonzalez, L. Diaz, C. Gonzalez-Macias and I. Mejia-Centeno, "Experimental and Vehicle (on road) Test Investigations of Spark-ignited Engine Performance and Emissions Using High Concentration of MTBE as Oxygenated Additive," *Fuel*, Vol.187, pp.276-284, 2017.
- 4) A. Khosousi, F. Liu, S. B. Dworkin, N. A. Eaves, M. J. Thomson, X. He, Y. Dai, Y. Gao, F. Liu, S. Shuai and J. Wang, "Experimental and Numerical Study of Soot Formation in Laminar Coflow Diffusion Flames of Gasoline/Ethanol Blends," *Combustion and Flame*, Vol.162, pp.3925-3933, 2015.
- 5) G. Martini, U. Manfredi, A. Krasenbrink, R. Stradling, P. J. Zemroch, K. D. Rose, H. Hass and H. Maas, *Effect of Oxygenates in Gasoline on Fuel Consumption and Emissions in Three Euro 4 Passenger Cars*, JRC Scientific and Policy Reports, The Joint Research Centre of the European Commission, 2013.
- 6) M. H. Lee, S. W. Kim, J. G. Kim, J. R. Kim, E. S. Yim and D. G. Kim, "The Fuel Properties and Exhaust Emission Characteristics According to the Oxygenated Fuel Additive Type," *KSAE Spring Conference Proceeding*, pp.470-476, 2009.
- 7) Y. W. Co, G. W. Kim and S. C. Rah, "MTBE: A Gasoline Blending Stock," *Auto Journal*, KSAE, Vol.13, No.1, pp.25-34, 1991.
- 8) C. Oh and G. Cha, "Influence of Oxygenate Content on Particulate Matter Emission in Gasoline Direct Injection Engine," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.14, No.6, pp.829-836, 2013.
- 9) T. Topgul, "The Effects of MTBE Blends on Engine Performance and Exhaust Emissions in a Spark Ignition Engine," *Fuel Processing Technology*, Vol.138, pp.483-489, 2015.
- 10) F. H. V. Coppens, J. De Ruyck and A. A. Konnov, "The Effects of Composition on Burning Velocity and Nitric Oxide Formation in Laminar Premixed Flames of CH₄+H₂+O₂+N₂," *Combustion and Flame*, Vol.149, No.4, pp.409-417, 2007.
- 11) J. W. Han, C. E. Lee, S. M. Kum and Y. S. Hwang, "Study of the Improvement of Chemical Reaction Mechanism of Methane Based on the Laminar Burning Velocities in OEC," *Energy & Fuels*, Vol.21, No.6, pp.3202-3207, 2007.
- 12) J. Oh and D. Noh, "Lifted Flame Behavior of a Non-premixed Oxy-methane Jet in a Lab-scale Slot Burner," *Fuel*, Vol.103, pp.862-868, 2013.
- 13) H. J. Curran, M. P. Dunphy, J. M. Simmie, C. K. Westbrook and W. J. Pitz, "Shock Tube Ignition of Ethanol, Isobutene and MTBE : Experiments and Modeling," *Symposium (International) on Combustion*, Vol.24, No.1, pp.769-776, 1992.
- 14) T. I. Mohamad and H. H. Geok, "Part-load Performance and Emissions of a Spark Ignition Engine Fueled with RON95 and RON97 Gasoline: Technical Viewpoint on Malaysia's Fuel Price Debate," *Energy Conversion and Management*, Vol.88, pp.928-935, 2014.