

## MTBE 함량 변화가 MPI 및 GDi 차량의 배출가스 및 연비에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

송호영\*,\*\*\* · 이민호\* · 김기호\* · 임태윤\*\* · 김홍집\*\*\*<sup>†</sup>

\*한국석유관리원 석유기술연구소, \*\*현대오일뱅크 연구소, \*\*\*충남대학교 기계공학과  
(2016년 10월 18일 접수, 2016년 12월 2일 수정, 2016년 12월 6일 채택)

## An experimental Study of the Effect of MTBE contents on Exhaust Emissions and Fuel Economy of MPI and GDi Vehicles

Hoyoung Song\*,\*\*\*Minho Lee\*Kiho Kim\*Taeyoon Lim\*\*Hongjip Kim\*\*\*<sup>†</sup>

\*Research Institute of Petroleum Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority,  
\*\*Lubricants R&D Institute, Hyundai Oilbank, \*\*\*Department of Mechanical Engineering, Chungnam  
National University

(Received 18 October 2016, Revised 2 December 2016, Accepted 6 December 2016)

### 요 약

본 연구에서는 합산소기재 중 MTBE를 휘발유에 첨가하여 산소함량(0, 1.0, 2.3 및 2.7 wt %)의 변화에 따라 MPI 및 GDi 차량에서 배출되는 유해한 배출가스와 연비를 분석하였다. 국내 및 미국의 연비시험방법인 FTP-75 mode와 HWFET mode를 적용하였다. CO, NMHC, NOx 배출량은 산소함량의 변화에 따라 미미한 차이는 있었지만 상관관계는 없었다. FTP-75 mode에서 CO<sub>2</sub> 배출량은 산소함량의 변화에 따라 증감의 경향성은 없었다. 하지만 차량이 예열된 상태이고 고속 운전영역이 포함된 FTP-75 mode의 phase-3와 HWFET mode에서는 산소를 함유한 연료의 CO<sub>2</sub> 배출량이 적었다. 입자개수 배출량은 산소함량과 음의 상관관계를 보였으며 산소함량 2.3 wt %에서 가장 적었다. 카본밸런스법에 의해 계산된 연비는 산소를 함유한 연료가 높았으며 2.3 wt %에서 가장 높았다.

**주요어** : 합산소기재, MTBE, 휘발유직접분사방식, 입자개수, 연비, 옥탄가

**Abstract** - In this study, the effects of MTBE contents as oxygenates in gasoline on exhaust emissions and fuel economy in MPI and GDi vehicles have been investigated. Various oxygen contents have been selected such as 0, 1.0, 2.3 and 2.7 wt%. FTP-75 and HWFET modes as fuel economy test methods which are widely used in Republic of Korea and US were applied to investigate exhaust emissions from the test vehicles. Emissions of CO, NMHC and NOx did not show significant correlation with oxygen contents in gasoline fuels, although having slight difference with these contents. In addition, CO<sub>2</sub> emissions were not significantly changed with respect to oxygen content. But in case of warm-up and FTP-75 and HWFET modes including high speed regimes, CO<sub>2</sub> emissions showed inverse correlation with oxygen contents. Particulate number concentration was inversely proportional to the oxygen contents, having the minimum value at the condition of 2.3 wt%. In case of fuel economy through carbon balance method, the highest value has been obtained at 2.3 wt% and there was positive correlation with oxygen contents and fuel economy.

**Key words** : Oxygenate, MTBE(Methyl Tert-Butyl Ether), GDi(Gasoline Direct Injection), PN(Particulate Number), RON(Research Octane Number)

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-42-821-5644 E-mail : khongjip@cnu.ac.kr

## 1. 서론

자동차용 휘발유의 기능을 향상시키기 위해 옥탄가 향상제, 청정분산제 등 다양한 첨가제가 사용된다. MTBE, Bio-ethanol 등은 옥탄가를 향상시키기 위해 사용되는 대표적인 합산소기재이다. MTBE는 휘발유의 옥탄가를 향상시키고 CO의 배출량을 감소시키는 것으로 알려져 있다. 하지만 수질오염성<sup>1)</sup> 때문에 일부 국가에서는 사용을 제한하고 있다.

합산소기재 중 MTBE를 휘발유에 첨가하면 증류성상은 감소하고 옥탄가는 증가하는 것으로 알려져 있다<sup>2,3)</sup>. 그리고 C. OH and G. CHA<sup>4)</sup>의 연구에 따르면 MTBE의 함량(산소함량)을 증가시킬 경우, 연비나 배출가스의 악영향 없이 입자상물질(PM, Particulate Matter)의 개수를 감소시키는 것으로 보고되었다. Tolga Topgul<sup>5)</sup>의 연구에서는 단기통 엔진에서 MTBE 함량별(0, 5, 10, 20 and 30 vol %)로 엔진 성능과 배출가스는 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. CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> 연소에서 O<sub>2</sub> 농도가 증가할 경우, 화염의 단열화염온도는 증가하므로 화염온도가 올라가 결국 화염속도도 빨라지는 것으로 알려져 있다<sup>6,7,8)</sup>. 그리고 CURRAN et al.<sup>9)</sup>은 Shock tube 실험에서 MTBE 함량이 증가하는 경우 화염속도가 빨라진다는 결과를 제시하였다.

이전 연구<sup>10)</sup>에서는 옥탄가(RON)를 92로 고정시키고 산소함량(1.0, 2.3, 2.7 wt %)을 변화시키면서 MPI(Multi Point Injection) 및 GDi(Gasoline Direct In-

jection) 차량의 배출가스 특성을 비교·평가하였다. 하지만 이전 연구는 옥탄가를 고정시키기 위해 방향족탄화수소함량 등 구성성분의 변화가 수반되어 순수하게 산소함량의 변화에 따른 배출가스 특성 등을 분석하는데 한계가 있었다. 그래서 본 연구에서는 휘발유를 구성하는 기본성분으로 구성된 Suboctane에 국내에서 대표적인 합산소기재인 MTBE를 첨가하여 산소함량(1.0, 2.3, 2.7 wt %)만을 변화시켰다. 이전 연구와 동일하게 배출가스, 연비, 미세입자를 측정하였다. 그리고 이전 연구에서는 FTP-75 mode에서 총량을 기준으로만 분석하였으나 본 연구에서는 FTP-75 mode의 각 phase별로 분석하고 HWFET mode를 추가하여 산소함량에 따른 영향을 세밀하게 비교·분석하고자 하였다.

## 2. 시험장치 및 방법

### 2-1. 시험용 차량

기존 휘발유 자동차는 흡기포트에 연료를 분사하여 연료와 공기가 혼합된 상태로 연소실에 유입되는 방식이었지만 최근에는 출력과 연비를 향상시키기 위해 연소실에 연료를 직접분사하는 방식이 적용된 차량의 보급이 늘고 있다. 본 연구에서는 연료분사방식의 변화를 반영하기 위해 MPI 차량과 GDi 차량을 각 1대씩 선정하였다. 시중 자동차용 휘발유를 사용하여 시험용 차량의 배출가스 인증기준 및 공인연비 결과와 비교분석하였다. 그 결과 노후에 따른 영향이 없으므로 확인되었다. 세부적인 제원은 Table 1와 같다.

### 2-2. 시험용 연료 및 물성평가 방법

본 연구에서는 정유사에서 휘발유 제조시 사용되는

Table 1. Specification of test vehicles

Injection type	MPI	GDI
Engine	nu MPI	Theta( $\theta$ ) II 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

반제품인 Suboctane을 base로 사용하고 MTBE를 첨가하여 산소함량을 1.0 wt %(MTBE 1.0), 2.3 wt %(MTBE 2.3), 2.7 wt %(MTBE 2.7) 함유한 3종의 연료를 제조하였다. 따라서 배출가스 분석을 위해서는 base 유를 포함하여 총 4종의 연료를 사용하였다.

시험용 연료는 한국산업규격 KS M 2612:2012 ‘자동차용 휘발유’방법에 의거하여 분석하였다. 그리고 품질기준에 없는 항목은 별도의 국내외 시험방법을 적용하였다. 분석항목 및 시험방법은 Table 2에 나타내었다.

**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). 입자개수 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(CO<sub>2</sub>)는 비분산적외선분석법(NDIR, Nondispersive Infrared Detection), 탄화수소(HC)는 열식불꽃이온화검출기법(HFID, Heated Flame Ionization Detection), 질소산화물(NOx)은 화학발광법(CLD, Chemiluminescence Detection), CH<sub>4</sub>는 GC-FID(Gas Chromatography-FID)를 적용하였다.

차량의 배출가스는 국내 및 미국 EPA에서 휘발유 차량의 연비 및 배출가스 시험방법인 FTP-75 mode (Fig. 2의 (a))와 HWFET mode(Fig. 2의 (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 복합에너지 소비효율(복합연비)을 계산하였다.

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 가감속 구간(transient cycle)으로 구성된다. 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. 2의 (b)와 같으며 동일한 cycle로 예열후 연속적으로 본 시험을 진행한다. 실험이 수행되는 동안 온도와 습도는 각각 25 ± 2 °C, 50 ± 5 RH %의 상태로 유지되었다.

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

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

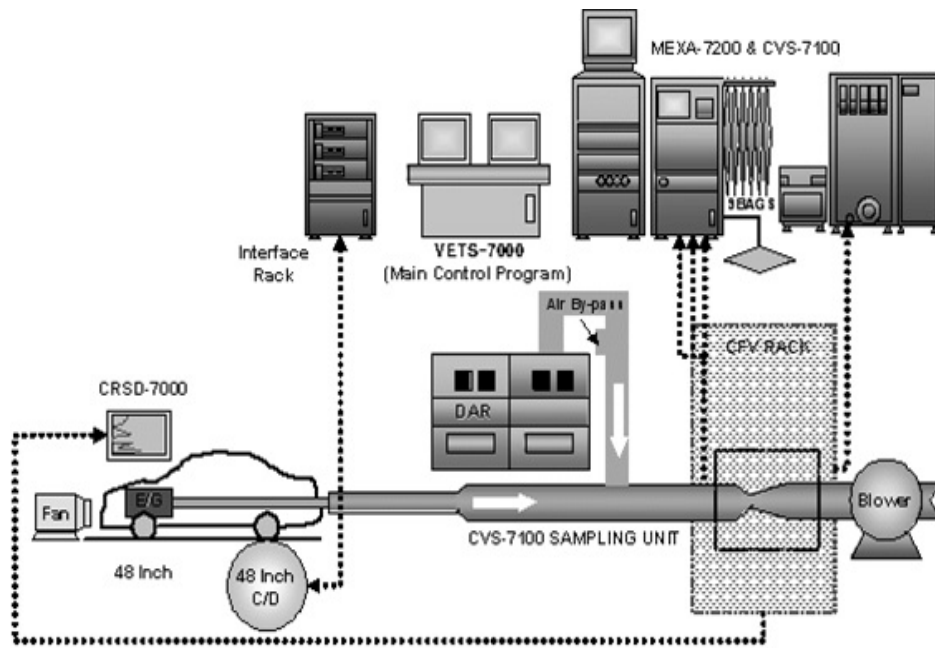


Fig. 1. The schematic of chassis dynamometer

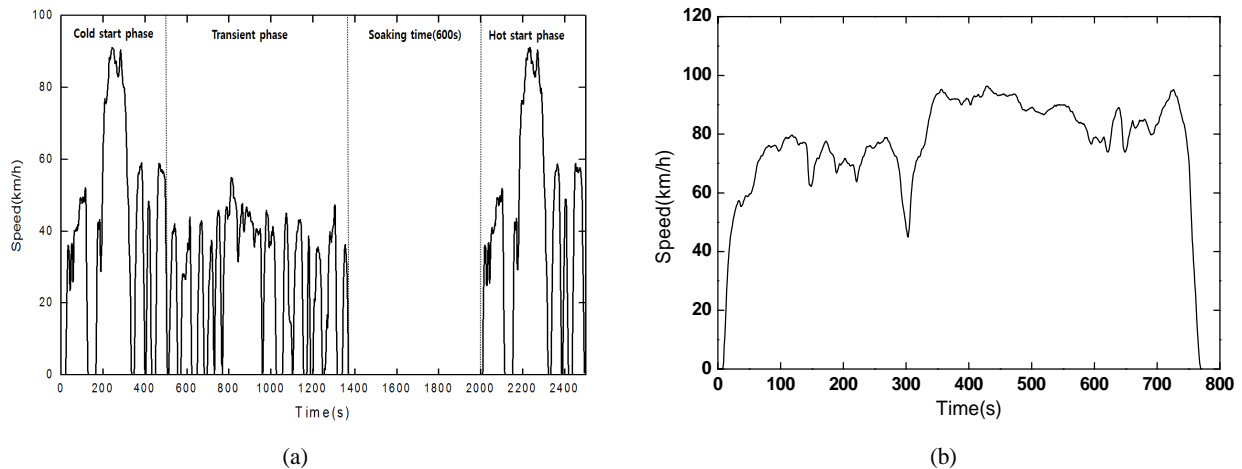


Fig. 2. Test modes : (a) FTP-75 mode, (b) HWFET mode

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3-1. 시험용 연료 물성분석

4종의 연료에 대해 옥탄가( RON, Research Octane Number), 증류성상 등 품질기준 항목을 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다. Suboctane의 산소함량은 0.15 wt % 였으며 MTBE를 첨가한 연료의 실제 산소함량은 목표치와 비슷한 1.16 wt %, 2.34 wt %, 2.78 wt % 였다. Suboctane과 MTBE 1.0 연료의 옥탄가는 89.2와 90.1로 품질기준(91이상 94이하)보다 낮았다. 그러나 두 연료의 다른 물성평가항목들은 품질기준에 적합하였다. MTBE 2.3과 MTBE 2.7은 연료품질기준의 모든 항목을 만족하였다.

Suboctane에 MTBE를 첨가하여 산소함량을 증가 시킴에 따라 옥탄가는 89.2에서 93.4로 비례적으로 증가하였다. MTBE의 낮은 비점(55 °C)으로 인해 저온 시동성(Cold starting)에 영향을 주는 것으로 알려진 T10(Distillation 10 vol %)은 53.9 °C에서 52.8 °C로 낮아졌으며 Hot driveability and vapor lock과 관련 있는 T50(Distillation 50 vol %)은 79.0 °C에서 72.0 °C로 낮아지는 결과를 보였다<sup>11)</sup>.

순발열량(MJ/kg)은 Suboctane보다 MTBE의 순발열량이 낮아 산소함량이 증가함에 따라 감소하는 결과를 보였다. Suboctane의 순발열량과 비교해서 MTBE 1.0은 약 1.7 % 감소, MTBE 2.3은 약 3.7 % 감소, MTBE 2.7도 약 3.7 % 감소하였다. 순발열량을 체적단위로 환산한 결과에서는 밀도 증가로 인해 MTBE 1.0은 약 1.3 % 감소, MTBE 2.3은 약 3.0 % 감소, MTBE 2.7은 약 2.9 % 감소하였다. 방향족함량, 벤젠함량, 올

레핀함량 등은 산소함량이 증가함에 따라 모두 감소하였지만 감소량은 매우 미미하였다.

#### 3-2. 배출가스(CO, NMHC, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>)

Fig. 3에 FTP-75 mode의 배출 총량과 각 phase별 배출량을 막대그래프로 표시하였으며, HWFET mode의 CO<sub>2</sub> 배출량 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 그리고 반복시험의 최대값과 최소값을 오차막대로 표시(Fig. 3 및 Fig. 4)하였다. HWFET mode에서의 CO, NMHC, NO<sub>x</sub> 배출량은 절대값이 매우 작고 연료별 또는 차량별로 차이가 없어서 다루지 않았다. 다만, FTP-75 mode의 결과와 비교분석을 위해 HWFET mode의 CO<sub>2</sub>(Fig. 4)와 입자개수 결과(Fig. 5)를 검토하여 나타내었다.

본 연구에서는 MTBE 함량을 달리하여 휘발유의 산소함량만을 변화시켰다. 산소함량 변화에 따른 밀도, 발열량, 증류성상, 방향족탄화수소함량 등의 변화는 MTBE 첨가에 따라 수반되는 변화로 종속변수로 간주하였다. 따라서 산소함량만을 독립변수로 가정하고 분산분석 중 일원배치법(one-way ANOVA)을 적용하였다. 신뢰수준은 95 %, 양측검증을 실시하였으며 귀무가설은 “산소함량의 변화에 따라 배출가스, 미세입자, 연비 등은 변화가 없다”고 가정하였다. 유의수준(p-value)이 0.025이하일 경우에 귀무가설을 기각할 수 있다.

##### 3-2-1. 일산화탄소(CO) 배출 특성

Fig. 3의 (a)는 FTP-75 mode에서 CO 배출량을 분석한 결과이다. GDi 차량과 MPI 차량에서 산소함량의 변화에 따른 CO 배출량은 증가나 감소의 경향성이

**Table 2.** Properties and method of test fuels

Items		Specification	Suboctane	MTBE 1.0	MTBE 2.3	MTBE 2.7	Method
Octane number(ROn)		91 ~ 94	89.2	90.1	92.7	93.4	ASTM D 2699
Distillation	10 vol % (°C)	≤ 70	53.9	53.2	53.0	52.8	ASTM D 86
	50 vol % (°C)	≤ 125	79.0	76.2	72.8	72.0	
	90 vol % (°C)	≤ 170	116.1	113.1	112.2	111.9	
	End point (°C)	≤ 225	192.7	178.6	181.2	179.6	
	residue(vol %)	≤ 2.0	0.9	0.9	0.9	0.9	
Vapor pressure(37.8 °C, kPa)		44 ~ 82	58.1	58.4	58.8	58.8	KS M 2692
Sulfur content(mg/kg)		≤ 10	3	3	3	3	ASTM D 5453
Aromatic content(vol %)		≤ 24(21)	2.5	2.3	2.2	2.1	ASTM D 6839
Benzene content(vol %)		≤ 0.7	0.5	0.5	0.4	0.4	ASTM D 6839
Olefin content(vol %)		≤ 16(19)	12.7	12.2	11.1	11.1	ASTM D 6839
Oxygen content(wt %)		≤ 2.3	0.15	1.16	2.34	2.78	ASTM D 6839
Net heating value	MJ/kg	*	47.4544	46.6490	45.6855	45.6798	KS M 2057
	MJ/m <sup>3</sup>	*	33,265	32,840	32,253	32,295	
Element analysis (wt %)	C	*	84.53	83.63	83.47	83.11	ASTM D 5291
	H	*	15.31	14.81	14.89	14.88	
Density(g/cm <sup>3</sup> )		*	0.701	0.704	0.706	0.707	KS M 12185

\*no specification

없었고 오차범위 이내의 미미한 차이를 보였다. CO 배출량의 미미한 차이와 삼원촉매와 같은 후처리 장치 등의 영향을 감안하면 본 연구에서는 산소함량의 변화가 CO 배출량에 영향을 미치는지 여부를 판단하기 어렵다.

### 3-2-2. 탄화수소(NMHC) 배출 특성

Fig. 3의 (b)는 FTP-75 mode에서 NMHC 배출량 결과이다. 산소함량의 변화에 따른 NMHC 배출량 분석 결과에서 MPI 차량의 배출량은 증·감의 경향성 없이 미미한 차이를 보였다. 반면 GDi 차량에서는 다른 결과를 보였다. NMHC 총량 기준으로 일원배치법으로 분석한 결과, p-value는 0.054로 0.025보다 높아 '산소함량의 변화에 따라 NMHC 배출량은 차이가 없다'는 귀무가설을 기각할 수 없었다. 하지만 Suboctane과 산소를 함유한 연료 3종의 배출량은 차이가 있었다. MTBE 1.0은 약 13.0 % 감소, MTBE 2.3은 약 17.6 % 감소,

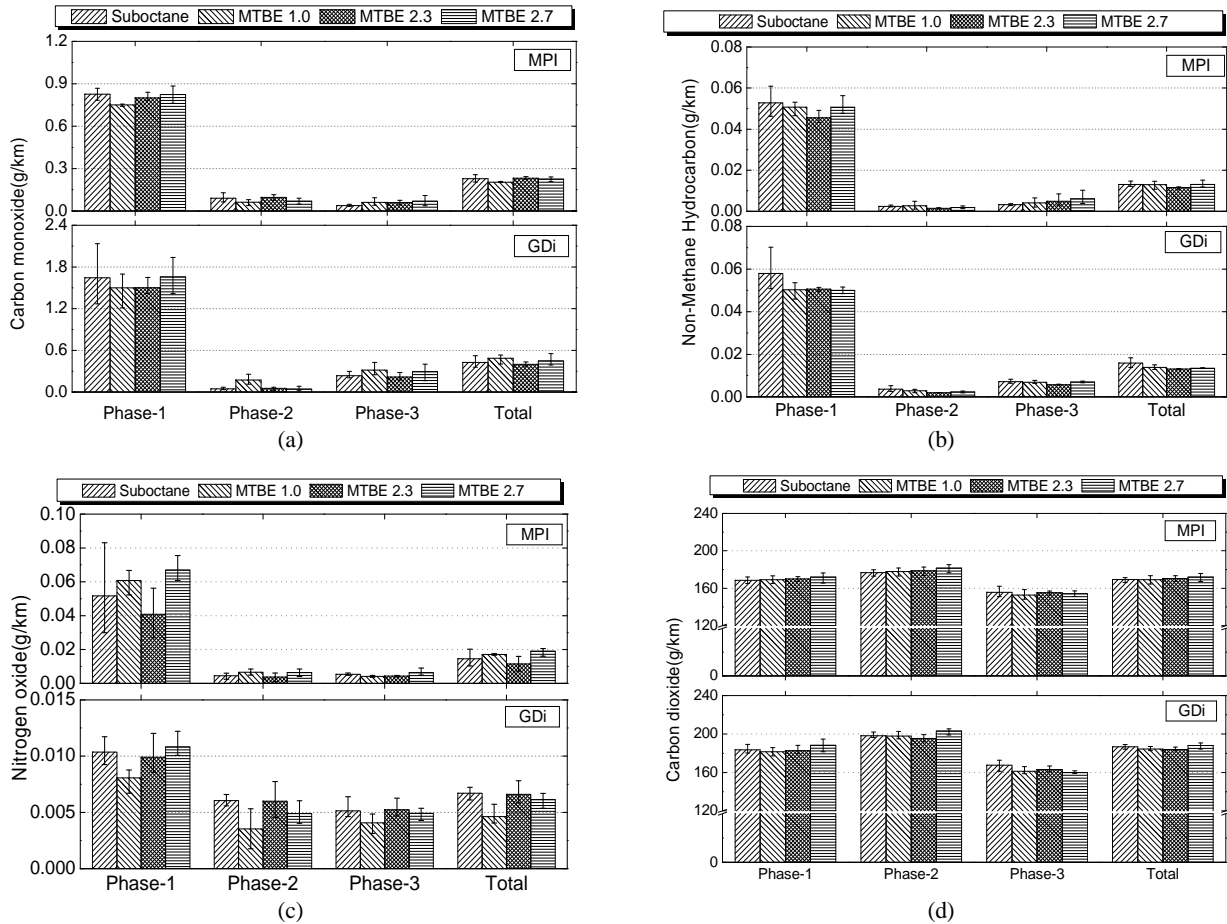
MTBE 2.7은 약 15.3 % 감소하였다. FTP-75 mode의 phase별로 분석한 결과에서도 산소를 함유한 연료의 배출량은 Suboctane의 배출량보다 적거나 동등한 수준이었다.

### 3-2-3. 질소산화물(NOx) 배출 특성

Fig. 3의 (c)는 FTP-75 mode에서 NOx 배출량 결과이다. 두 차량의 NOx 배출량을 분석한 결과, 산소함량의 변화에 따라 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 후처리장치인 EGR(Exhaust Gas Recirculation)과 삼원촉매의 영향인 것으로 판단된다.

### 3-2-4. 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출 특성

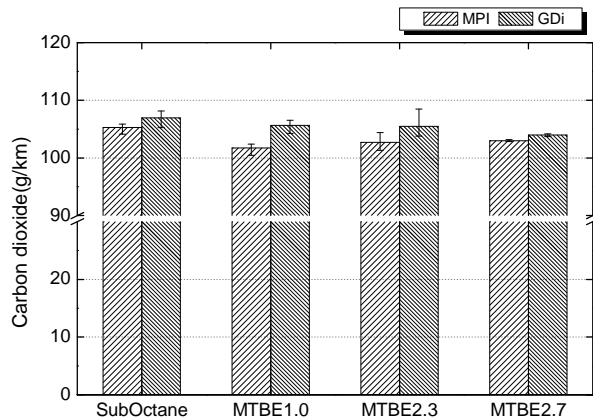
Fig. 3의 (d)는 FTP-75 mode에서 CO<sub>2</sub> 배출량을 분석한 결과이다. MPI 차량에서 CO<sub>2</sub> 배출량은 산소함량이 증가함에 따라 미미하게 증가하는 경향을 보였다. Suboctane의 CO<sub>2</sub> 배출량과 비교해서 MTBE 1.0은



**Fig. 3.** Emission concentration on FTP-75 mode ; (a) : Carbon monoxide, (b) : Non-methane hydrocarbon, (c) : Nitrogen oxide, (d) : Carbon dioxide ; Phase-1 : cold start condition, Phase-2 : transient condition, Phase-3 : hot start condition , Total : the sum on FTP-75 mode with weighting factor

약 0.1 % 감소, MTBE 2.3은 약 0.7 % 증가, MTBE 2.7은 약 1.6 % 증가하는 결과를 보였다. FTP-75 mode의 phase-1과 phase-2에서는 산소함량이 증가함에 따라 미미하게 증가하였다. Phase-1에서 각각 약 0.3 %, 0.9 %, 2.0 % 증가하였다. Phase-2에서는 각각 약 0.6 %, 1.2 %, 2.7 % 증가하였다. 반면, phase-3에서는 각각 약 1.8 %, 0.3 %, 1.1 % 감소하는 등 전반적으로 Subotcane보다 감소하였다. Fig. 4은 HWFET mode의 CO<sub>2</sub> 배출량 결과이다. HWFET mode에서는 phase-3와 비슷하게 산소를 함유한 연료의 CO<sub>2</sub> 배출량이 Subotcane보다 각각 약 3.4 %, 2.5 %, 2.2 % 감소하였다. 하지만 산소함량의 변화에 따른 경향성은 발견하기 힘들었다.

반면 GDi 차량에서는 FTP-75 mode에서 CO<sub>2</sub> 배출량은 경향성이 없는 것으로 나타났다. Suboctane의 CO<sub>2</sub> 배출량과 비교했을 때 MTBE 1.0은 약 1.3 % 감소,



**Fig. 4.** Carbon dioxide from MPI and GDi vehicles on HWFET mode

MTBE 2.3은 약 1.5 % 감소, MTBE 2.7은 약 0.7 % 증가하는 결과를 보였다. FTP-75 mode의 phase-1과

phase-2에서는 MTBE 1.0의 CO<sub>2</sub> 배출량은 각각 약 1.1 %, 0.2 % 감소, MTBE 2.3는 약 0.5 %, 1.4 % 감소하였다. 반면 MTBE 2.7은 각각 약 2.5 %, 2.4 % 증가하였다. Phase-3에서는 산소를 함유한 연료의 CO<sub>2</sub> 배출량은 각각 약 3.8 %, 2.7 %, 4.5 % 감소하였다. HWFET mode의 CO<sub>2</sub> 배출량 결과도 각각 약 1.2 %, 1.4 %, 2.8 % 감소하였다.

따라서 두 차량의 CO<sub>2</sub> 배출량을 분석한 결과, CO<sub>2</sub> 배출량 총량기준으로 산소함량에 따른 뚜렷한 경향성은 없다고 판단되었다. 하지만 산소를 함유한 연료의 CO<sub>2</sub> 배출량은 FTP-75 mode의 phase-3와 HWFET mode에서도 감소하였다. 즉, 차량이 예열된 상태이고 고속의 운전조건이 포함된 조건에서 산소를 함유한 연료의 CO<sub>2</sub> 배출량이 적었다.

### 3-3. 입자개수(Particle number concentration) 배출 특성

Fig. 5은 FTP-75 mode와 HWFET mode의 입자개수 배출량 결과이다. 앞의 그림에서와 마찬가지로 결과 값은 막대그래프로 나타내었으며 오차막대는 최대값과 최소값을 의미한다. Fig. 5의 (a)에는 FTP-75 mode의 각 phase별 결과와 총량의 결과를 분리하여 표시하였고, Fig. 6에는 Suboctane의 입자개수 배출량과 비교한 변화율을 나타내었다.

MPI 차량의 경우, FTP-75 mode에서 입자개수 배출량은 총량을 기준으로 산소함량을 함유한 연료의 배출량은 Suboctane의 배출량보다 적었다. MTBE 1.0은 약 9.7 % 감소, MTBE 2.3은 약 44.0 % 감소, MTBE 2.7은 약 30.8 % 감소하였다. 그리고 HWFET mode에서

도 각각 약 52.0 %, 42.1 %, 68.5 % 감소하였다. FTP-75 mode의 입자개수 배출량을 일원배치법(95 % 신뢰수준, 양측검증)으로 분석한 결과, p-value는 0.268로 매우 높아 산소함량에 증가에 따라 뚜렷한 차이를 확인할 수 없었으며 상관관계 분석결과(Pearson correlation coefficient<sup>12,13</sup>)에서도 약한 음의 상관관계(R=-0.691)를 보였다. HWFET mode의 입자개수 배출량을 분석한 결과, p-value는 0.032로 높아 귀무가설을 기각할 수는 없었지만 추가 시험으로 귀무가설 기각여부를 다시 판단해야 할 것으로 판단된다. 그리고 약한 음의 상관관계(R=-0.785)가 있는 것으로 나타났다.

GDi 차량의 경우, FTP-75 mode에서 입자개수 배출량은 총량을 기준으로 산소를 함유한 연료의 배출량은 Suboctane의 배출량보다 각각 약 4.6 %, 45.1 %,

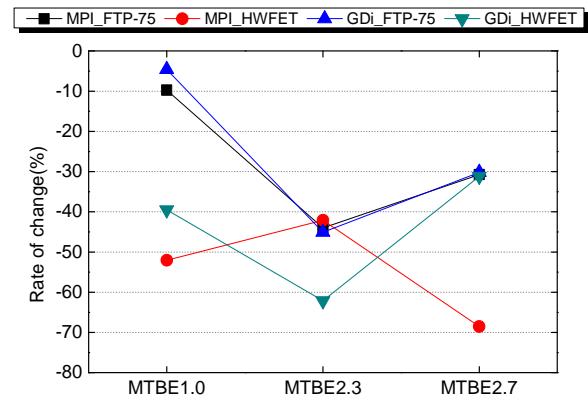


Fig. 6. Rate of change of Particle number concentration from MPI and GDi vehicles on FTP-75 and HWFET mode

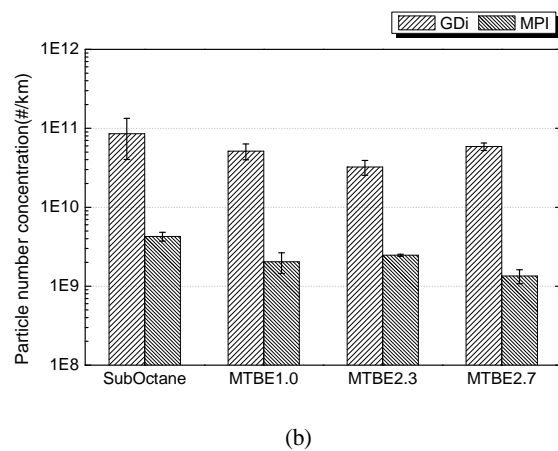
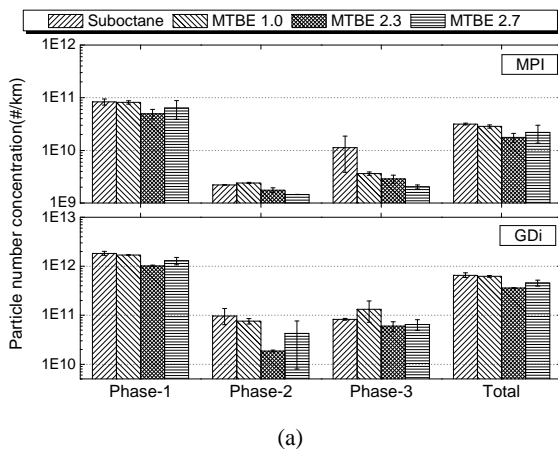


Fig. 5. Particulate number concentration ; (a) : FTP-75 mode(Phase-1 : cold start condition, Phase-2 : transient condition, Phase-3 : hot start condition, Total : an average on FTP-75 mode), (b) : HWFET mode

30.2 % 적었다. 그리고 HWFET mode에서도 각각 약 39.5 %, 62.1 %, 31.2 % 감소하였다. FTP-75 mode의 입자개수 배출량을 일원배치법으로 분석한 결과, p-value는 0.012로 0.025보다 낮아 ‘산소함량의 변화에 따라 입자개수 배출량은 차이가 없다’는 귀무가설을 기각할 수 있었다. 그리고 음의 상관관계( $R=-0.825$ )가 있는 것으로 나타났다. HWFET mode의 입자개수 배출량을 분석한 결과, p-value는 0.388로 매우 높아서 귀무가설을 기각할 수 없었다. 그리고 상관관계도 낮게( $R=-0.495$ ) 나타났다.

입자개수 배출량 특성을 종합하면, MPI 차량에서는 산소함량과 입자개수 배출량은 약한 음의 상관관계가 있었다. 그리고 GDi 차량의 FTP-75 mode에서는 산소함량 변화에 따른 입자개수 배출량은 의미있는 차이가 있었다. 즉, 산소함량은 FTP-75 mode에서 GDi 차량의 입자개수 배출량을 감소시키는 주요 인자임을 확인하였다. 그리고 HWFET mode에서도 약한 음의 상관관계가 있었다. 두 시험용 차량의 입자개수 배출량 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다. 입자개수 배출량은 산소를 함유한 연료에서 적었으며 산소함량과 입자개수 배출량은 음의 상관관계가 있다. 그리고 전반적으로 산소함량 2.3 wt %의 배출량이 가장 적었다.

### 3-4. 연비(Fuel economy) 특성

산소함량에 따른 연비시험결과를 Fig. 7, Fig. 8 및 Table 3에 나타내었다. Fig. 7의 (a)는 FTP-75 mode의 연비결과를 각 phase와 total로 분리하여 표시하였으며 Fig. 7의 (b)는 HWFET mode의 연비결과이다. Fig.

8은 MPI 차량과 GDi 차량의 FTP-75 mode와 HWFET mode에서 Suboctane의 연비와 비교해서 산소를 함유한 연료 3종의 연비변화율 결과이다. FTP-75 mode의 연비결과는 각 phase와 total 결과를 분리하여 표시하였다. Table 3에는 FTP-75 mode와 HWFET mode의 연비, 보정연비 그리고 복합연비를 나타내었다. 그리고 Suboctane과 산소를 함유한 연료간 복합연비 변화율을 나타내었다.

MPI 차량의 FTP-75 mode의 연비시험결과는 산소함량의 변화에 따라 뚜렷한 경향성이 없는 것으로 나타났다. Suboctane의 연비와 비교해서 MTBE 1.0은 동일수준, MTBE 2.3은 약 0.3 % 증가, MTBE 2.7은 약 0.9 % 감소하였다. HWFET mode에서도 산소함량의 변화에 따라 경향성이 없었다. 하지만 산소를 함유한 연료의 연비가 Suboctane보다 모두 높게 나타났다(각각 약 3.6 %, 2.4 %, 2.4 % 증가). 그리고 복합에너지소비효율 결과(Table 3)에서도 산소함량의 변화에 따라 경향성은 없었으나 산소를 함유한 연료의 연비가 각각 약 1.2 %, 1.7 %, 0.3 % 높았으며 그 중 산소함량 2.3 wt %에서 가장 높았다.

MPI 차량에서 FTP-75 mode의 각 phase별 연비시험결과는 다음과 같다. Suboctane의 연비와 3종의 산소함유 연료의 연비를 비교했을 때, phase-1에서는 -1.0 % ~ 0.4 %의 변화를 보였으며 phase-2에서는 -1.7 % ~ 0.2 %의 변화를 보였다. Phase-1과 phase-2에서는 연비의 연료간 편차는 크지 않았다. 다만, MTBE 2.7의 연비가 가장 낮았다. 그리고 phase-3에서는 산소를 함유한 연료의 연비가 Suboctane보다 각각 약 1.9 %, 1.5 %, 1.9 % 높았다.

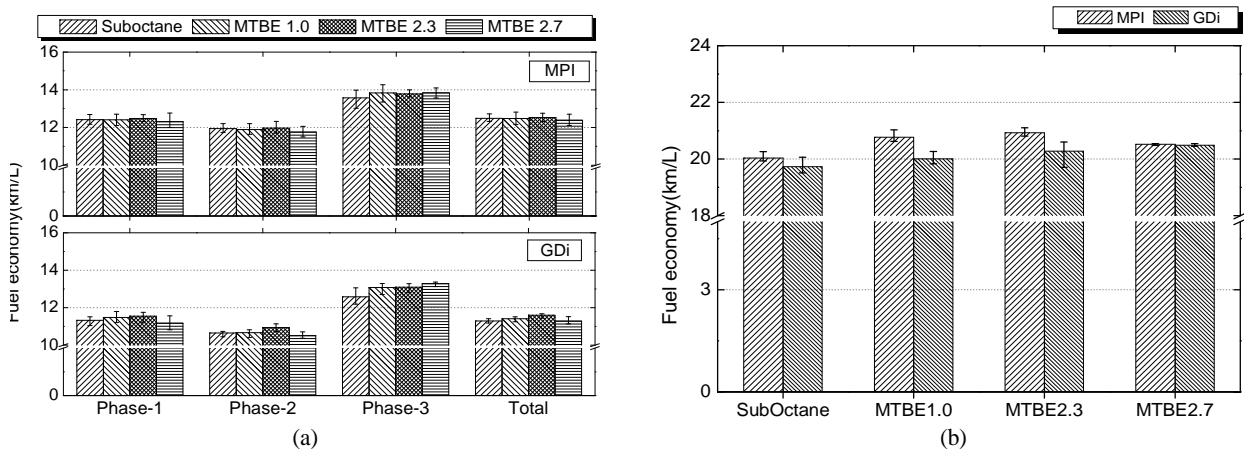
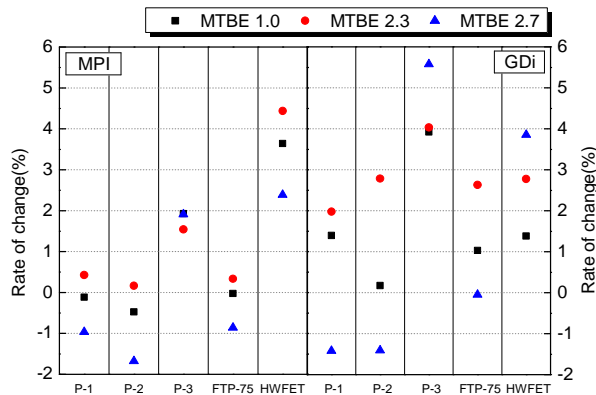


Fig. 7. Fuel economy ; (a) : FTP-75 mode(Phase-1 : cold start condition, Phase-2 : transient condition, Phase-3 : hot start condition, Total : the sum on FTP-75 mode with weighting factor), (b) : HWFET mode



**Table 3.** Fuel economy : Ratio : rate of change to combined fuel economy of Suboctane

Vehicle	Fuel	Fuel economy(km/L)				Ratio (%)	
		FTP-75 mode		HWFET mode			Combined
		Not	corrected	Not	corrected		
MPI	Suboctane	12.48	9.72	20.04	14.00	11.27	-
	MTBE 1.0	12.48	9.72	20.77	14.48	11.41	1.2
	MTBE 2.3	12.53	9.75	20.93	14.58	11.46	1.7
	MTBE 2.7	12.38	9.65	20.52	14.31	11.30	0.3
GDi	Suboctane	11.30	8.86	19.73	13.80	10.56	-
	MTBE 1.0	11.41	8.95	20.00	13.98	10.67	1.1
	MTBE 2.3	11.59	9.08	20.28	14.16	10.83	2.5
	MTBE 2.7	11.29	8.86	20.49	14.30	10.69	1.2



**Fig. 8.** Rate of change of fuel economy for MPI and GDi vehicles ; P-1 : cold start condition on FTP-75 mode, P-2 : transient condition on FTP-75 mode, P-3 : hot start condition on FTP-75 mode, FTP-75 : the sum on FTP-75 mode with weighting factor, HWFET : the sum or an average on HWFET mode

GDi 차량의 FTP-75 mode의 연비시험결과에서도 MPI 차량과 동일하게 산소함량의 변화에 따라 뚜렷한 경향성이 없음을 확인하였다. Suboctane의 연비와 비교해서 MTBE 1.0은 약 1.0 % 증가, MTBE 2.3은 약 2.6 % 증가, MTBE 2.7은 동일하였다. HWFET mode에서도 산소함량에 따라 뚜렷한 경향성은 없으며 Suboctane보다 각각 약 1.3 %, 1.3 %, 3.0 % 높았다. 그리고 복합에너지소비효율 결과에서도 산소함량의 변화에 따라 경향성은 없었으나 산소를 함유한 연료의 연비가 각각 약 1.1 %, 2.5 %, 1.2 % 높았으며 산소함량 2.3 wt %에서 가장 높았다.

GDi 차량에서 FTP-75 mode의 각 phase별 연비시험결과는 다음과 같다. Suboctane의 연비와 비교해서 phase-1과 phase-2에서 MTBE 1.0과 MTBE 2.3의 연비는 높았으며 MTBE 2.7은 낮았다. Phase-1에서 각각 약 1.4 % 증가, 약 2.0 % 증가, 약 1.4 % 감소, phase-2에서 각각 약 0.2 % 증가, 약 2.8 % 증가, 약 1.4 % 감소하였다. 반면, phase-3에서는 산소를 함유한 연료의 연비는 Suboctane의 연비보다 각각 약 3.9 %, 4.0 %, 5.6 % 높았다.

### 3-5. 연료 물성과 연비 결과에 대한 분석

연료의 순발열량은 산소함량이 증가함에 따라 감소하는 결과를 보였다. Suboctane의 순발열량과 비교했을 때(체적단위), MTBE 1.0은 약 1.3 %, MTBE 2.3은 약 3.0 %, MTBE 2.7은 약 2.9 % 감소하였다. 순발열량의 감소는 연비의 감소를 유발할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 산소를 함유한 연료의 연비가 높았다. 이는 산소함량이 연소효율 개선에 기여한 것으로 판단된다. 하지만 산소함량에 완벽하게 비례하지 않았으며 2.3 wt %에서 가장 높은 연비를 보였다<sup>5)14)</sup>.

## 4. 결론

본 연구에서는 휘발유에 MTBE를 첨가하여 산소함량을 1.0 wt %, 2.3 wt %, 2.7 wt %로 변화시키면서 배출가스, 미세입자, 연비의 변화를 비교분석하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1) 휘발유에 MTBE를 첨가하여 산소함량을 증가시키에 따라 옥탄가(ROK)는 비례적으로 증가하였다. 그리고 증류성상(T10, T50)과 순발열량은 감소하고 밀도는 증가하였다.

2) CO, NMHC, NO<sub>x</sub>는 산소함량의 변화와 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 그러나 GDi 차량에서 산소를 함유한 연료의 NMHC 배출량은 그렇지 않은 연료보다 낮았다.

3) CO<sub>2</sub> 배출량은 총량기준으로 산소함량의 변화에 따라 증·감의 경향성은 없었다. 하지만 차량이 예열된 상태이고 고속운전영역이 포함된 FTP-75 mode의 phase-3와 HWFET mode에서 산소를 함유한 연료의 CO<sub>2</sub> 배출량은 Suboctane보다 각각 최대 4.5 % 감소, 최대 3.4 % 감소하였다.

4) 입자개수 배출량은 산소함량 2.3 wt %에서 배출량이 가장 적었으며 산소함량과 음의 상관관계를 보였다.

5) 연비는 산소함량의 증가에 따라 뚜렷한 경향성은 없었다. 하지만 산소를 함유한 연료의 연비가 그렇지 않은 연료보다 높았으며 산소함량 2.3 wt %에서 가장 높았다.

## 후 기

본 연구는 환경부와 오토오일위원회의 '4차년도 한국형 오토오일 연구사업'으로 수행되었으며, 관련 기관의 연구과제 지원에 감사의 뜻을 표합니다.

## References

- 1) James E. McCarthy, Mary Tiemann, 2006, MTBE in Gasoline : Clean Air and Drinking Water Issues, Congressional Research Service Reports, Vol. 26
- 2) M.H. Lee, S.W. Kim, J.G. Kim, J.R. Kim, E.S. Yim and D.G. Kim, 2009, The fuel properties and exhaust emission characteristics according to the oxygenated fuel additive type, 2009 KSAE Spring Conference Proceeding, KSAE09-B0075
- 3) Y.W.Co, G.W.Kim and S.C.Rah, 1991, MTBE: A Gasoline Blending Stock, Transactions of KSAE, Vol. 13, No. 1
- 4) C. OH and G. CHA, 2013, Influence of Oxygenate Content on Particulate Matter Emission in Gasoline Direct Injection Engine, International Journal of Automotive Technology, Vol. 14, No. 6, pp. 829-836
- 5) Tolga Topgul, 2015, The Effects of MTBE blends on Engine Performance and Exhaust Emissions in a Spark Ignition Engine, Fuel Processing Technology, Vol. 138, pp. 483-489
- 6) F.H.V. Coppens, J. De Ruyck and A.A. Konnov, 2007, The effects of composition on burning velocity and nitric oxide formation in laminar premixed flames of CH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>, Combustion and Flame, Vo. 149, No. 4, pp. 409-417
- 7) J.W. Han, C.E. Lee, S.M. Kum and Y.S. Hwang, 2007, 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
- 8) J.Oh and D. Noh, 2013, Lifted flame behavior of a non-premixed oxy-methane jet in a lab-scale slot burner, Fuel, Vol. 103, pp. 862-868
- 9) Henry J. Curran, Mary P. Dunphy, John M. Simmie, Charles K. Westbrook and William J. Pitz, 1992, Shock tube ignition of ethanol, isobutene and MTBE : Experiments and modeling, Symposium (international) on Combustion, Vol. 24, No. 1, pp. 769-776
- 10) T.Y. Lim, H.Y. Song, C.K. Park, I.H. Hwang, J.H. Ha and B.K. Na, 2015, Characteristics of Particle Number and Exhaust Emission by Alteration of MTBE Content in Gasoline, Journal of Energy Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 42-47
- 11) Furey, R.L. and King, J.B., 1980, Evaporative and Exhaust Emissions from Cars Fueled with Gasoline Containing Ethanol or Methyl tert-Butyl Ether, SAE Paper 800261
- 12) N.J.D.Nagelkerke, 1991, A Note on a General Definition of the Coefficient of Determination, Biometrika, Vol. 78, No. 3, pp. 691-692
- 13) Josep Lee Rogers & W.Alan Nicewander, 1988, Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient, The American Statistician, Vol. 42, No. 1, pp. 59-66

- 14) M.A. Hamdan, T.A. Al-Subaih, 2002, Improvement of Locally Produced Gasoline and Studying its Effects on Both The Performance of The Engine and The Environment, Energy Conversion and Management, Vol. 43, pp. 1811-1820