

저농도 바이오알코올 혼합 연료가 스파크 점화 엔진 차량의 연비 및 배출가스에 미치는 영향

차규섭^{1,2,†} · 노수영²

¹GS칼텍스(주) 기술연구소, ²충북대학교 바이오시스템공학과

Influence of Low Level Bio-Alcohol Fuels on Fuel Economy and Emissions in Spark Ignition Engine Vehicles

GYUSOB CHA^{1,2,†}, SOOYOUNG NO²

¹GS Caltex Corp. R&D Center, 359 Expo-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34122, Korea

²Department of Biosystems Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju 28644, Korea

†Corresponding author :
autocha@gscaltex.com

Received 2 April, 2020
Revised 18 April, 2020
Accepted 30 April, 2020

Abstract >> This study was conducted to analyze the impact of low level bio-alcohols that can be applied without modification of vehicles to improve air quality in Korea. The emissions and fuel economy of low level bio-alcohols mixed gasoline fuels of spark ignition vehicles, which are direct injection and port fuel injection, were studied in this paper. As a result of the evaluation, the particle number (PN) was reduced in all evaluation fuels compared to the sub octane gasoline without oxygen, but the correlation with the PN due to the increase in the oxygen content was not clear. In the CVS-75 mode, emitted CO tended to decrease compared to sub octane gasoline, but no significant correlation was found between NMHC, NOx and fuel economy. In addition, it was found that the aldehyde increased in the oxygenated fuel, and there was no difference in terms of the amount of aldehyde generated among a series of bio-alcohol mixed fuels.

Key words : Bio-alcohol(바이오알코올), Bio-ethanol(바이오에탄올), Bio-butanol(바이오부탄올), Fuel economy(연비), Emission(배출가스), Spark ignition engine (가솔린 기관), Particle number(입자 개수)

1. 서론

지구 온난화 등 대기 환경오염에 대한 우려로 인해 전 세계적으로 온실가스 저감 및 대기질 개선에 대한 관심이 높아지고는 있으나 오염 원인으로 주목 받고 있는 화석연료의 사용도 지속적으로 증가¹⁾하고

있어 문제 해결을 위한 다양한 기술과 정책들이 쏟아져 나오고 있다.

미국과 유럽(EU)의 경우, 온실가스 저감 등 대기 환경 개선을 위해 수송부문에 바이오연료 사용의 무화를 포함해 다양한 신재생 에너지 도입에 적극적이다²⁾. 우리나라의 경우 온실가스뿐만 아니라 미세

먼지로 인한 대기 환경 문제가 날이 심각해져 정부 차원에서 다양한 정책을 추진하고 있으나, 실질적인 효과는 아직 미미한 상황이다.

온실가스 저감에 효과적이면서 기존 인프라의 큰 변경이나 추가 없이 신속히 도입이 가능하여 전 세계적으로 널리 사용 중인 바이오디젤과 바이오에탄올 등 바이오알코올 혼합 연료의 경우 합산소 연료로서 미세먼지(particulate matters [PM] 및 particulate number [PN])의 직접적인 저감에도 기여가 가능한 것으로 알려져 있다³⁻⁶⁾.

현재 우리나라에서는 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」에 따라 수송부문에서는 바이오디젤과 바이오가스를 상용화하고 있다^{7,8)}.

국내 주요 수송용 연료 중 하나인 자동차용 경유에 2018년부터 바이오디젤 3.0%를 의무혼합하여 사용하고 있으나, 휘발유는 아직 바이오연료 혼합 제품이 사용되고 있지 않은 실정이다. 반면 해외(미국/브라질 등)에서는 대표적인 바이오알코올 연료인 바이오에탄올을 스파크 점화 차량에 휘발유 대체 연료 또는 첨가제로서 많이 사용하고 있다^{9,10)}.

바이오에탄올은 바이오매스 생산 시 저감되는 CO₂ 이외에 높은 산소함량으로 인해 휘발유의 연소성을 개선하지만 에너지 밀도가 상대적으로 낮아 연비가 떨어지고 친수성에 의한 상분리 문제, 금속 및 고무 같은 재질에 대한 높은 부식성에 의해 저유소 및 주유 공급시설의 일부 개조가 필요하다는 단점도 있다¹¹⁾.

반면에 바이오부탄올은 바이오에탄올 대비 에너지 밀도가 높고 물에 대한 용해도와 부식성이 낮아 유통 인프라의 변경 없이 사용할 수 있다는 장점¹²⁾이 있어 근래에는 바이오부탄올 생산 기술 및 연료 물성, 연소 특성 등에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다¹³⁻¹⁹⁾.

하지만 대부분의 선행 연구들은 혼합량 10% 이상의 고농도 알코올 연료의 엔진 성능 및 연소 특성 분석에 초점을 맞추고 있으며, 현재 운행 중인 차량의 개조 없이 바로 적용 가능한 수준의 저농도 바이오알코올의 합산소 연료로서 효과 분석을 위한 실차 성능 및 배출가스 관련 연구는 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 대표적인 바이오알코올 연료인 바이오에탄올과 바이오부탄올 그리고 두 가지 알코올이 가지고 있는 장점을 최대화하기 위해 최적 비율로 혼합한 알코올 연료²⁰⁾를 저농도(6%)로 휘발유에 혼합하여 시험차량의 개조 없이 합산소 연료 측면에서 입자상 물질의 개수(particle number, PN) 변화 차이를 확인하였다. 이와 함께 차량의 연비, 규제 배출가스(NMHC, CO, NOx) 및 미규제 배출가스인 알데하이드류도 측정하여 바이오알코올의 종류별 저농도 혼합에 의한 효과를 종합적으로 비교 검증하고자 하였다.

2. 실험

2.1 평가시료

시험연료는 합산소제(methyl tert-butyl ether, MTBE 등)가 혼합되지 않아 옥탄가(research octane number, RON)가 상대적으로 낮은 산소 미함유 sub octane gasoline을 기본 연료로 하고 바이오에탄올과 바이오부탄올, MTBE를 저농도로 혼합하여 석유 및 석유대체연료 사업법상 자동차용 품질기준²¹⁾을 만족하는 시료 4종을 제조하였다.

제조된 시료는 국내 휘발유 산소함량 규격 2.3무계%에 해당하는 바이오에탄올 6%를 혼합한 연료(E6, bio-ethanol 6% + sub octane gasoline 94%)와 알코올 연료 간 성능 상대 비교를 위한 바이오부탄올 6% (B6, bio-butanol 6% + sub octane gasoline 94%), 바이오에탄올과 바이오부탄올을 7:3의 비율로 혼합한 알코올 연료 6% (EB6, Bio-ethanol [7] : bio-butanol [3] 6% + sub octane gasoline 94%)를 주입한 연료이다. 대조군으로는 현재 국내 휘발유 생산 시 합산소제로 사용 중인 MTBE를 E6 연료와 동등 수준의 옥탄가를 가질 수 있도록 8% 혼합한 시료를 준비하였다.

시험에 사용된 총 5종의 연료에 대한 주요 물성은 Table 1과 같으며, Table 2에는 휘발유에 사용되는 주요 합산소제의 물성을 나타내었다.

Table 1. The physical properties of evaluation samples²⁹⁾

Spec. name		Sub octane	Ethanol 6%	Butanol 6%	EB (E7: B3) 6%	MTBE 8%
Density, @15°C, kg/m ²		716	719	721	720	718
Distillation (°C)	10%	53.3	50.7	55.9	50.4	53.4
	50%	92.3	89.2	90.9	88.1	86.8
	90%	139.2	137.6	138.4	135.7	136.9
	E.P	184.2	182.7	181.9	180.8	182.2
Octane number	RON	91.3	93.9	91.5	92.9	93.4
	MON	82.7	82.6	83.9	83.5	84.2
Higher calorific value (cal/g)		11,193.0	10,925.5	11,018.3	10,946.9	11,023.1
RVP (37.8°C, kPa)		58.6	66.0	56.7	63.9	59.9
Olefin (vol%)		18.24	17.24	17.1	17.31	17.06
Oxygen (wt%)		0.01	2.28	1.7	2.07	1.47
Aromatic (vol%)		13.37	12.65	12.54	12.61	12.31
C10+ aromatics (vol%)		1.4	1.32	1.31	1.31	1.27

Table 2. Properties of oxygenated compounds

	Ethanol	n-Butanol	MTBE
Molar mass	46.07	74.12	88.15
Density (kg/l)	0.803	0.814	0.740
LHV (MJ/kg)	26.27	32.92	35.1
RON	111	96	119
MON	89	78	101
Oxygen content (wt.%)	35.3	21.6	18.2
Boiling point (°C)	78	118	55
Solubility in water (g/L)	≥100	63	51

Table 3. Test vehicle specification

	Vehicle #1	Vehicle #2
Engine type	Inlined spark-ignited 4 stroke 4 cylinder engine	
Supercharging system	Twin scroll turbocharger	-
Injection type	Direct injection	Port injection
Compression ratio	10.0:1	10.5:1
Engine capacity (CC)	1,997	1,998
Max. power	245 ps/ 5,000-6,200 rpm	165 ps/ 6,200 rpm
Max. torque	35.7 kg·m/ 1,250-4,800 rpm	20.2 kg·m/ 4,600 rpm
Transmission	A/T-8	A/T-6
After treatment	3 way catalyst	

2.2 평가차량 및 시험모드

본 연구에서는 연료 분사 방식이 달라 배출 특성이 상이할 수 있는 점을 고려하여 gasoline direct injection (GDI) 엔진 탑재 차량 1종과 port fuel injection (PFI) 엔진 탑재 차량 1종을 시험차량으로 선정하였으며, 차량과 엔진은 어떠한 개조도 가하지 않았다. 시험차량에 대한 세부적인 제원은 Table 3에 나타내었다.

시험모드는 국내에서 휘발유 차량의 공인연비 및

배출가스 측정 시에 사용되는 CVS-75 모드(시내 주행 모사) 및 HWFET 모드(고속도 주행 모사)를 사용하였다.

2.3 측정장치

차량 성능 및 환경성 평가는 차대동력계를 이용하여 진행하였으며, 측정 시스템의 개념도와 차대동력

계 시스템은 Figs. 1, 2에 각각 나타내었다. 시험에 사용된 차대동력계는 2륜 roller-type dynamometer (single roll 48 inch, BEP, MI, USA)로서 국내 3.5톤 이하 소형 자동차의 배출가스 및 연료소비율을 측정할 수 있도록 형식 승인된 시험 장비이다.

배출가스 측정은 시험차량이 차대동력계에서 정해진 모드 주행을 할 때 배기관으로부터 배출되는 가스를 정용량 시료채취장치(constant volume sampler, CVS)에서 일정량의 공기로 희석 후, 시료 채취백으로 보내고 모인 배출가스 시료를 정량분석하게 된다.

CO, NMHC, NO_x 등의 규제 물질 분석에는 일본 Horiba사(Kyoto)의 MEXA 7400 분석기를 사용하여 분석하였으며, 입자상 물질의 개수는 laser based par-

ticle counting system (SPCS 2000, Horiba, Kyoto, Japan)을 사용하여 입자상 물질의 개수를 측정하였다. 알코올 연료 연소 시 배출량이 증가한다고 알려진 미규제 물질인 알데하이드의 측정은 국내에서 제작된 C2K CREATIVE사(Bucheon, Korea)의 C2030 자동차배기가스 aldehyde sampling system을 이용하여 운전 모드 동안 카트리지에 포집한 후 solvent로 추출하여 high performance liquid chromatography로 분석하였다.

시험차량의 평가 시료 교체는 기존 연료를 연료탱크에서 모두 제거 후 새로운 평가용 시료로 2회 세척하고 최소 100 km 이상 주행하여 연료계통에 남아있을 수 있는 이전 시료를 완전히 제거함으로써 시험차량의 상태가 교체된 연료에 일치되도록 조치하였다. 시험차량은 시험 전 25±5, 습도 50±10% 상태로 유지된 soaking room에서 12시간 이상 soaking하여 온도 및 기타 외부 환경 요인에 의한 변인을 제거하였다. 시험 데이터는 각 시험 조건별로 최소 3회 이상 반복 시험을 진행하여 그 평균값을 취하였다.

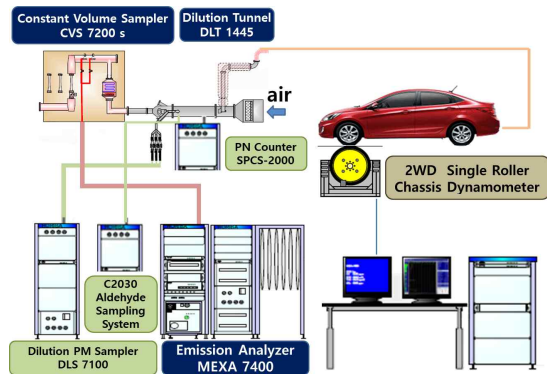


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup



Fig. 2. 2WD Chassis dynamometer systems

3. 결과 및 고찰

3.1 평가 연료의 연료적 특성

평가 연료는 분석 결과 석유 및 석유대체연료 사업법상 자동차용 품질기준을 모두 만족하였다. 옥탄가(ROK)와 산소함량의 경우 바이오알코올 및 합산소제의 특성에 따라 sub octane gasoline 대비 상승하였으며, 발열량은 휘발유 대비 낮은 열량으로 인해 감소하는 경향을 나타냈다.

입자상 물질 및 HC, CO 저감에 효과적인 물성인 산소함량의 경우 에탄올의 분자량 대비 높은 산소함량으로 인해 E6 시료에서 상대적으로 가장 높은 값을 나타내었다. 또한, 연비와 관련된 물성인 밀도의 경우 부탄올 자체의 높은 밀도로 인해 B6 연료에서 가장 높게 나타났으며, 고위발열량의 경우, 합산소 시료 중 MTBE 혼합 시료에서 가장 높은 값을 나타내었다. 시동성과 연소성에 영향을 미치는 증기압은

E6 연료에서 가장 높게 나타났으며, B6 연료에서 가장 낮은 값을 보였다. 기타 배출가스에 영향을 미치는 것으로 알려진 올레핀과 방향족 함량도 바이오알코올과 합산소제의 혼합량에 비례하여 감소하는 결과를 보였다²²⁻²⁵⁾.

3.2 바이오알코올 혼합에 따른 배출가스 특성

3.2.1 입자상 물질 개수(PN) 배출 특성

CVS-75 모드에서의 바이오알코올 종류 및 합산소제에 따른 입자상 물질의 개수 변화를 Fig. 3에 나타내었다.

일반적으로 산소함량이 증가함에 따라 입자상 물질이 감소하는 것으로 알려져 있다²⁶⁾. 하지만 이번 연구에서는 산소함량 차이에 따른 입자상 물질 개수의 변화는 확연히 나타나지 않았다. 전체적으로 모든 평가 시료에서 산소가 미포함된 sub octane gasoline 대비 입자상 물질의 개수가 적게 나타났으나, EB6나 B6 대비 산소함량이 상대적으로 낮은 MTBE 시료의 경우 산소함량이 가장 높은 E6 시료와 유사한 수준으로 입자상 물질의 개수가 적게 나타났다. 이는 시료별 산소함량 차이에 의한 영향이 성분이 적을수록 입자상 물질을 적게 배출한다고 알려진 밀도나 올레핀, 방향족 성분과 같은 입자상 물질에 영향^{25,27,28)}을 미치는 타 물질과의 복합적인 작용에 기인한 것으로 판단된다. 시험 차종별로는 GDI 차량인 Vehicle #1 이 PFI 차량인 Vehicle #2 대비 모든 시료에서 입자

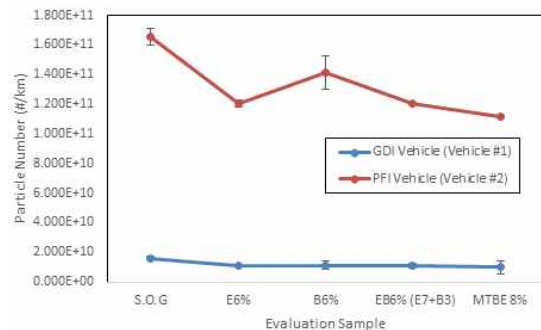


Fig. 3. Particle number by evaluation samples and vehicle type in CVS-75 mode

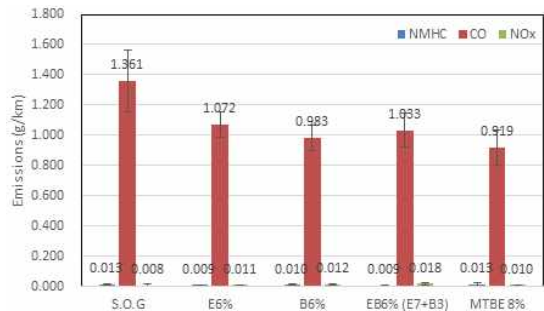
상 물질이 적게 나타났다. 일반적으로 연소실 내에서 혼합기가 충분히 혼합될 시간이 없는 GDI 차량에서 입자상 물질이 PFI 차량 대비 많이 발생하는 것으로 알려져 있으나 시험용 GDI 차량은 EURO 6 대응 차량으로서 강화된 PN 규제에 대응해 연소 성능을 개선한 결과에 기인한 것으로 보인다.

3.2.2 연비 및 규제 배출가스 특성

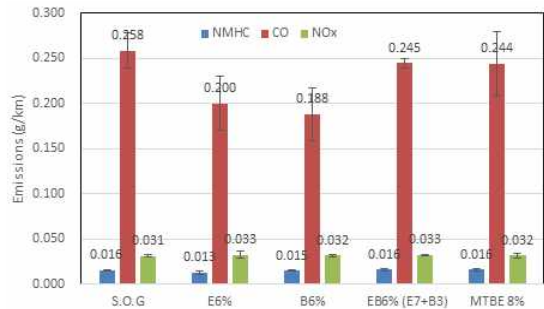
바이오알코올 종류 및 합산소제 혼합에 따른 비메탄 탄화수소(NMHC), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx) 배출량 변화를 Figs. 4, 5에 나타내었다.

바이오알코올과 합산소제가 포함된 연료의 사용은 일산화탄소와 탄화수소는 감소시키고 NOx 배출은 증가시키는 것으로 알려져 있다^{22,23)}. 그러나 본 연구에서는 평가 시료의 산소함량에 따른 배출가스의 유의미한 변화는 관찰되지 않았다.

CVS-75 모드 Vehicle #1과 Vehicle #2에서 불완전 연소에 의해 발생하는 CO는 합산소제가 미포함된



(a) GDI vehicle (Vehicle #1)



(b) PFI vehicle (Vehicle #2)

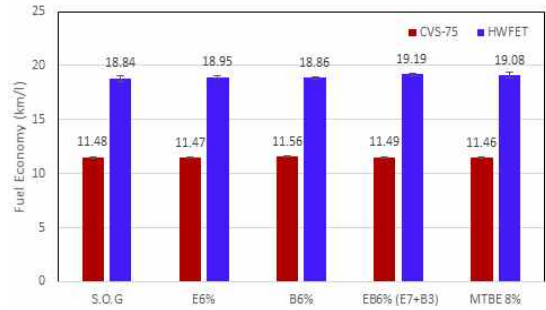
Fig. 4. Result of exhaust emission in CVS-75 mode

sub octane gasoline 대비 모든 시료에서 낮게 배출되었으나, 각 시료의 산소함량 차이에 의한 상관관계는 나타나지 않았다. NMHC와 NOx는 CO 대비 배출량이 매우 적고 결과도 각 평가 시료 간 시험 편차 수준의 결과를 나타내었다. 전체적으로 평가 시료와 규제 배출가스 간 유의한 상관관계는 보이지 않았다.

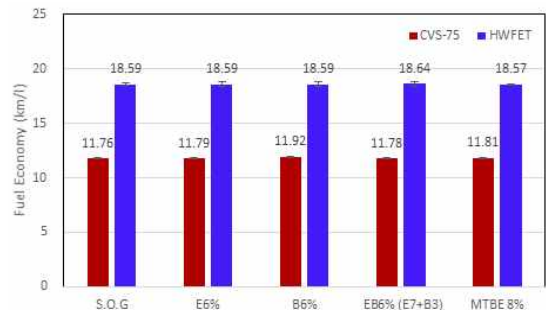
HWFET 모드에서도 산소함량, 옥탄가 등 주요 물성과 모든 규제 배출가스 간의 유의한 경향성을 확인할 수 없었으며, NMHC의 경우 배출량이 너무 적어 배기분석기에 유의미한 값이 측정되지 않았다.

결과적으로 규제 배출가스는 바이오알코올 혼합비율이 낮아 연료의 특성 변화가 크지 않고 차량에 설치된 삼원촉매에서 대부분 제거됨으로써 나타난 효과에 기인한 것으로 사료된다.

Fig. 6은 각 시료에 따른 연비 차이를 보여준다. 본 연구에 사용된 바이오알코올과 합산소제의 발열량은 휘발유보다 낮아 sub octane gasoline 대비 연비가 감소하는 것이 일반적이니²³⁾, 두 시험차량 모두 CVS-75

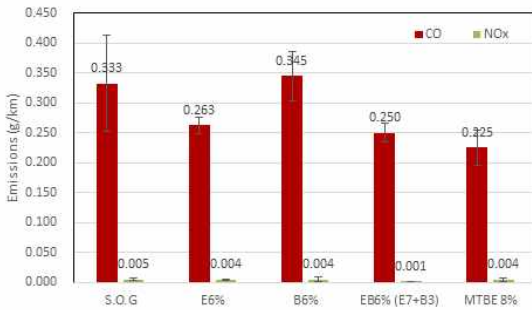


(a) GDI vehicle (Vehicle #1)

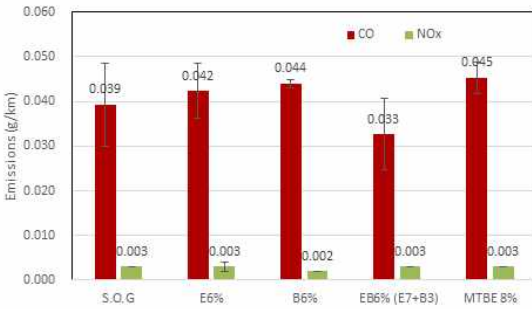


(b) PFI vehicle (Vehicle #2)

Fig. 6. Result of fuel economy in CVS-75 and HWFET mode

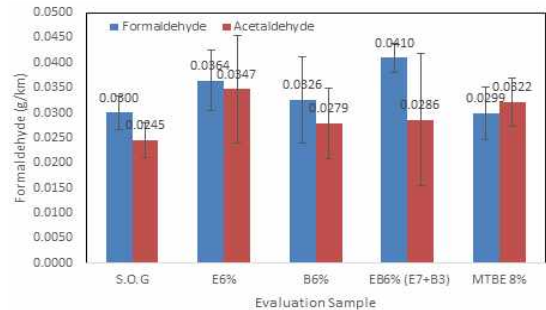


(a) GDI vehicle (Vehicle #1)

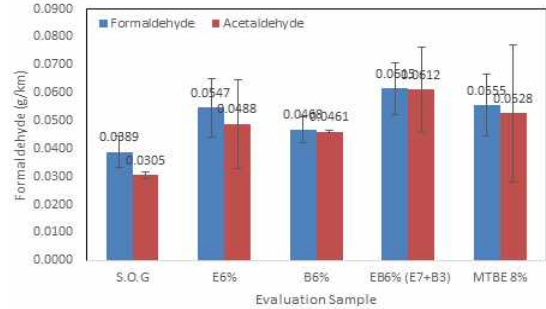


(b) PFI vehicle (Vehicle #2)

Fig. 5. Result of exhaust emission in HWFET mode



(a) GDI vehicle (Vehicle #1)



(b) PFI vehicle (Vehicle #2)

Fig. 7. Result of aldehyde emission in CVS-75 mode

및 HWFET 모드에서 시험 편차 수준 내의 연비 변화를 나타내었다. 이는 합산소 연료 혼합에 따른 발열량 감소와 RON 상승에 따른 점화시기 최적화에 의한 연소효율 상승효과가 서로 상쇄되어 나타난 현상으로 추정된다.

3.2.2 미규제 배출가스 특성

Fig. 7에는 유해 발암물질인 아세트알데하이드와 포름알데하이드의 배출 특성을 나타내었다. 다수의 연구에서 에탄올을 비롯한 알코올 연료는 연소 시 알데하이드 발생량을 증가시킨다는 연구²⁵⁾ 결과가 있다. 본 연구에서도 바이오알코올 등 합산소제가 포함된 시료는 sub octane gasoline 대비 절대적인 배출량의 차이는 있으나 배출가스 내 알데하이드가 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만 바이오알코올 종류 및 합산소제에 따른 알데하이드 배출량 차이는 유의한 결과를 나타내지 않았다.

4. 결 론

본 연구는 바이오에탄올, 바이오부탄올, 바이오에탄올과 부탄올 혼합 알코올을 저농도로 혼합한 휘발유(sub octane gasoline)의 평가를 통해 저농도 바이오알코올이 스파크 점화 차량의 배출가스와 연비에 미치는 영향을 분석하였다.

1) 합산소 기체인 바이오알코올과 MTBE 혼합 효과로 옥탄가와 산소함량, 밀도 등은 상승하였으며, 올레핀과 방향족 성분은 혼합에 의한 희석 효과로 인해 sub octane gasoline 대비 상대적으로 낮은 값을 나타내었다.

2) 바이오알코올 및 합산소기체가 혼합된 평가 시료는 산소가 미포함된 sub octane gasoline 대비 입자상 물질의 개수가 감소하는 결과를 보임으로써 합산소 물질에 의한 입자상 물질 저감 효과는 확인할 수 있었다. 반면, 산소함량 증가에 따른 입자상 물질 개수의 차이는 명확히 나타나지 않았다.

3) 불완전 연소에 의해 발생하는 CO는 냉간 운전 기간이 포함된 CVS-75 모드에서는 sub octane gaso-

line 대비 모든 시료에서 낮게 배출되었으나, 산소 함량 차이에 의한 상관관계는 나타나지 않았다. NMHC와 NOx는 CO 대비 배출량이 매우 적고 결과도 각 평가 시료 간 시험 편차 수준의 결과를 나타내어 평가 시료와 규제 배출가스 간 유의한 상관관계를 보이지 않았다. 연비의 경우도 시험 편차 수준의 결과를 나타냈다.

4) 유해 발암물질인 알데하이드의 경우 바이오알코올 등 합산소제가 포함된 시료에서 배출량이 증가하는 경향을 보였으나, 바이오알코올 종류에 따른 알데하이드 배출량은 유의미한 결과가 나타나지는 않았다.

5) 저농도 알코올 혼합에 의한 평가 결과 기존 시판 휘발유(MTBE 혼합) 대비 바이오알코올 혼합 시료들에서 연비나 배출가스 등의 유의미한 성능 차이는 확인할 수 없었으나, 휘발유 차량의 개조 없이 저농도 바이오알코올 혼합하여 사용할 수 있으며, 국내 도입 시 입자상 물질 감소에 따른 대기 환경개선과 국가적 차원의 수송부문에서 온실가스 감축에 일정 기여할 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 2016년 산업통상자원부 에너지기술 개발 사업의 재원으로 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다(‘E3 급 수송용 바이오연료의 국내 적용성 향상을 위한 최적화 기술개발’, NO. 20163010092160).

References

1. KEEI, "Analysis of IEA world energy outlook 2018", World Energy Market Insight, Vol. 18, No. 43, 2018. Retrieved from http://www.keei.re.kr/insight?open&p=%2Fweb_energy_new%2Finsight.nsf%2Fview_detail%2FEC869900FCB5D6D94925835C003FFCBA&s=%3Fopendocument%26opentype%3Dpopup.
2. J. H. Cho, H. S. Lee, and E. M. Yang, "A foreign case study of renewable fuel standard with respect to biogas", KEI Working Paper, 2013. Retrieved from <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/091/019/005/5568224.pdf>.
3. G. Karavakakis, D. Short, D. Vu, M. Villela, A. Asa-Awuku,

- and T. D. Durbin, "Evaluating the regulated emissions, air toxics, ultrafine particles, and black carbon from SI-PFI and SI-DI vehicles operating on different ethanol and iso-butanol blends", *Fuel*, Vol. 128, 2014, pp. 410-421, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.03.016>.
4. Z. Zhang, T. Wang, M. Jia, Q. Wei, X. Meng, and G. Shu, "Combustion and particle number emissions of a direct injection spark ignition engine operating on ethanol/gasoline and n-butanol/gasoline blends with exhaust gas recirculation", *Fuel*, Vol. 130, 2014, pp. 177-188, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.052>.
 5. A. K. Agarwal, T. Gupta, P. C. Shukla, and A. Dhar, "Particulate emissions from biodiesel fuelled CI engines", *Energy Convers. Manag.*, Vol. 94, 2015, pp. 311-330, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.094>.
 6. H. N. Kim and B. C. Choi, "The effect of biodiesel and bioethanol blended diesel fuel on nanoparticles and exhaust emissions from CRDI diesel engine", *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 1, 2010, pp. 157-163, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.04.008>.
 7. "The 4th basic new and renewable energy plan", Ministry of Trade, Industry & Energy, 2014.
 8. "The 2nd basic energy plan", Ministry of Trade, Industry & Energy, 2014.
 9. A. E. Wheals, L. C. Basso, D. M. G. Alves, and H. V. de Amorim, "Fuel ethanol after 25 years" *Trends in Biotechnology*, Vol. 17, No. 12, 2000, pp. 482-487, doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-7799\(99\)01384-0](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(99)01384-0).
 10. B. D. Solomon, J. R. Barnes, and K. E. Halvorsen, "Grain and cellulosic ethanol: history, economics, and energy policy", *Biomass and Bioenergy*, Vol. 31, No. 6, 2007, pp. 416-425, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.01.023>.
 11. C. S. Jung, "Quality property of bioethanol blends & counterplan of infrastructure", *The Korean Society for New and Renewable Energy*, Vol. 2, No. 4, 2006, pp. 102-106. Retrieved from <http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200606142009049.page>.
 12. S. H. Lee and M. H. Eom, "Current status and prospect of bio-butanol production technology", *Special Topics in Perspectives of Industrial Chemistry*, Vol. 16, No. 2, 2013, pp. 26-37.
 13. M. H. Eom, B. E. Kim, H. Jang, S. H. Lee, W. H. Kim, Y. A. Shin, and J. H. Lee, "Dynamic modeling of a fermentation process with ex situ butanol recovery (ESBR) for continuous biobutanol production", *Energy & Fuels*, Vol. 29, No. 11, 2015, pp. 7254-7265, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01031>.
 14. J. M. Woodley, "Bioprocess intensification for the effective production of chemical products", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 105, 2017, pp. 297-307, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.01.015>.
 15. J. S. Ko, "A study on the spray, combustion and emissions characteristics of biobutanol fuel in a GDI engine system", MSc. Dissertation, Hanyang University, 2015. Retrieved from <http://repository.hanyang.ac.kr/handle/20.500.11754/128921>.
 16. X. Gu, Z. Huang, J. Cai, J. Gong, X. Wu, and C. F. Lee, "Emission characteristics of a spark-ignition engine fuelled with gasoline-n-butanol blends in combination with EGR", *Fuel*, Vol. 93, 2012, pp. 611-617, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.040>.
 17. S. Szwaja and J. D. Naber, "Combustion of n-butanol in a spark-ignition IC engine", *Fuel*, Vol. 89, No. 7, 2010, pp. 1573-1582, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.043>.
 18. J. Dernotte, C. Mounaim-Rousselle, F. Halter, and P. Seers, "Evaluation of butanol-gasoline blends in a port fuel-injection, sparkignition engine", *Oil & Gas Science and Technology*, Vol. 65, No. 2, 2010, pp. 345-351, doi: <https://doi.org/10.2516/ogst/2009034>.
 19. S. Pukalskas, Z. Bogdanovičius, E. Sendžikienė, V. Makarevičienė, and P. Janulis, "The mixture of biobutanol and petrol for Otto engines", *Transport*, Vol. 24, No. 4, 2009, pp. 301-307, doi: <https://doi.org/10.3846/1648-4142.2009.24.301-307>.
 20. S. Kim, J. K. Kim, C. K. Park, and J. H. Ha, "Study on fuel characteristics depending on mixing ratio of bio-butanol and bio-ethanol", *The Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 6, 2017, pp. 704-711, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.6.704>.
 21. "Petroleum and alternative fuel business act", *Enforced Date* 28, No. 14476, 2017.
 22. H. S. Farkade and A. P. Pathre, "Experimental investigation of methanol, ethanol and butanol blends with gasoline on SI engine", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 2, No. 4, 2012, pp. 205-215. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.413.8365&rep=rep1&type=pdf>.
 23. T. Wallner, S. A. Miers, and S. McConnell, "A comparison of ethanol and butanol as oxygenates using a direct-injection, spark-ignition engine", *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 131, No. 3, 2009, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3043810>.
 24. 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 Proceedings*, pp. 470-476, 2009. Retrieved from <https://dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01506637>.
 25. T. Thummadetsak, A. Wuttimongkolchai, S. Tunyapisetsak, and T. Kimura, "Effect of gasoline compositions and properties on tailpipe emission of currently existing vehicles in Thailand", *SAE Technical Paper* 1999-01-3570, 1999, doi: <https://doi.org/10.4271/1999-01-3570>.

26. C. Oh and G. S. Cha, "Influence of oxygenate content on particulate matter emission in gasoline direct injection engine", *Int. J. Automot. Technol.*, Vol. 14, No. 6, pp. 829-836, doi: <https://doi.org/10.1007/s12239-013-0091-2>.
27. W. Betts, S. Fløysand, and F. Kvinge, "The influence of diesel fuel properties on particulate emissions in european cars", *SAE Technical Paper 922190*, 1992, doi: <https://doi.org/10.4271/922190>.
28. C. Vuk and S. J. Vander Griend, "Fuel property effects on particulates in spark ignition engines", *SAE Technical Paper 2013-01-1124*, 2013, doi: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1124>.
29. G. S. Cha and S. Y. No, "A study on the characteristics of spark ignition engine cleanliness by low level bio-alcohol blending", *The Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 30, No. 5, 2019, pp. 428-435, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.5.428>.