

바이오알코올 혼합연료에 따른 배출 특성 연구

김 신[†] · 김재곤 · 이민호 · 황인하 · 이정민

한국석유관리원 석유기술연구소

Study on Emission Characteristics Depending on Mixing Fuels of Bio-Alcohol

SHIN KIM[†], JAE-KON KIM, MIN-HO LEE, IN-HA HWANG, JUNG-MIN LEE

Korea Petroleum Quality & Distribution Authority, 33 Yangcheong 3-gil, Ochang-eup, Cheongwon-gu, Cheongju 28115, Korea

[†]Corresponding author :
shinnala@kpetro.or.kr

Received 8 October, 2018
Revised 5 December, 2018
Accepted 30 December, 2018

Abstract >> The dependence on global fossil fuels has been gradually reducing all over the world. Some countries which recognized the important of environmental values were joining to carry out international GHG goals. Our country has also participated with high targets (37% reduction compared to BAU 2030 years). So we need to supply materials of lower GHG value such as a bio-diesel. Bio-alcohol is one of the similar bio-fuels that can be reducing GHG. A lot of countries had tried to commercialize through various R&D for bio-alcohol. In this study, we analyzed the fuel characteristics of bio-alcohol fuel produced by domestic technology. And we evaluated a possibility to use as vehicle fuel through mixing of bio-alcohol and gasoline. The mixed fuels were satisfied with 2.3 wt% of oxygen content that is standard of the petroleum and petroleum alternative fuel business Act. We tried to evaluate a emission characteristic of vehicle by mixed fuel. In accordance with the results we tried to find a correlation between fuel and emission.

Key words : Bio-alcohol(바이오알코올), Mixing fuel(혼합연료), Bio-ethanol(바이오에탄올), Bio-butanol(바이오부탄올), Oxygen contents(산소함량), Research octane number(옥탄가), Reid vapour pressure(증기압), Emission gas(배출가스)

1. 서론

전 세계 화석연료에 대한 의존성은 서서히 감소하는 추세를 보이고 있으나 이는 선진국 대상으로 환경적 가치의 중요성을 인식한 일부 국가에서만이 국

가 간 협약, 향후 이행목표 수립 등 세계적인 공동목표로 추진하고 있다. 우리나라 또한 높은 목표(2030년 BAU 대비 37% 감축)¹⁾를 통하여 참여하고 있으며 이러한 목표 수립은 산업, 농업, 폐기물 등 다양한 분야에서 발생하는 온실가스와 관련된 IPCC guidelines

의 배출계수²⁾를 이용하여 산정하게 된다. 이에 낮은 배출계수 연료 및 탄소중립에 가까운 신재생에너지 원 사용이 반드시 필요하며 특히 높은 비율을 차지하는 수송 분야에서의 감축 기여가 필요한 시점이다. 향후, 전기 및 수소 차량의 보급화를 통하여 온실가스 제로화 방안을 실현시킬 것으로 보이거나 이러한 도입의 경제적 부담에 의하여 현실적으로 빠르게 진행되지 않을 것으로 전문가들은 예측하고 있다. 따라서 바이오디젤과 같은 새로운 바이오원료의 보급이 필요하며 수송 부문 차량의 근본적 개조 없이 사용 가능한 연료의 적용이 필요하다. 따라서 RFS 제도에 의해 보급되고 있는 바이오디젤³⁾ 외 새로운 석유대체연료 도입이 필요하며 현재까지 많은 국가에서 다양한 검증을 통하여 상용화된 바이오알코올 연료가 대상이 될 것이다.

이에 본 연구를 통하여 다양한 국가에서 이미 상용화된 바이오에탄올과 도입 가능한 바이오부탄올 선정하여 국내 연료 품질 기준인 석유 및 석유대체연료 사업법 만족과 동시에 보다 향상된 연료적 특성을 지닌 혼합연료를 기반⁴⁾으로 국내 보급비율이 높은 차량을 선정하여 후단에서 발생하는 환경오염 물질의 배출 특성을 확인하였다.

2. 실험

2.1 평가시료

석유 및 석유대체연료 사업법 상 자동차용 휘발유에 대한 품질 기준은 16항목이며 산소함량 즉, 탄소-산소-수소 구조에서 산소가 함유된 양을 2.3무게%

Table 1. The results of mixing fuels with ethanol & butanol

| Spec name | | Sub Octane | E6 (E100) | E6 (E70:B30) | E6 (E30:B70) | E6 (B100) |
|------------------------------------|-----------------|------------|-----------|--------------|--------------|-----------|
| RON | | 90.0 | 92.2 | 91.8 | 91.5 | 90.6 |
| Distillation (°C) | T10 | 58.1 | 52.3 | 53.3 | 55.6 | 60.0 |
| | T50 | 99.8 | 95.6 | 95.6 | 94.5 | 96.0 |
| | T90 | 164.3 | 159.4 | 159.6 | 159.5 | 159.6 |
| | FBP (°C) | 198.3 | 196.5 | 204.6 | 198.1 | 201.8 |
| | Residue (vol%) | 1.0 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 |
| RVP (37.8°C, kPa) | | 52.7 | 59.8 | 57.3 | 55.2 | 50.8 |
| Sulfur (mg/kg) | | 9.6 | 7.2 | 7.1 | 7.0 | 6.9 |
| Component analysis | Aromatic (vol%) | 18.0 | 19.0 | 18.9 | 18.4 | 18.2 |
| | Benzene (vol%) | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| | Olefin (vol%) | 11.4 | 10.8 | 10.8 | 10.7 | 10.4 |
| | Oxygen (wt%) | <0.1 | 2.3 | 2.2 | 2.2 | 2.4 |
| | MTBE (vol%) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| | TAME (vol%) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| | Ethanol (vol%) | - | 6.0 | 4.6 | 2.4 | 0.0 |
| | Butanol (vol%) | - | 0.0 | 1.9 | 5.5 | 9.9 |
| Elemental analysis | H (m/m %) | 14.3 | 14.2 | 14.2 | 14.2 | 14.1 |
| | C (m/m %) | 85.7 | 83.5 | 83.6 | 83.6 | 83.5 |
| Gross calorific value (MJ/kg) | | 46.57 | 45.45 | 45.63 | 45.36 | 45.31 |
| Net calorific value (MJ/kg) | | 43.31 | 42.24 | 42.44 | 42.17 | 42.12 |
| Water (wt%) | | 0.008 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| Density (15°C, g/cm ³) | | 0.729 | 0.730 | 0.731 | 0.732 | 0.734 |

이하로 규정하고 있다³⁾. 이에 Table 1에서와 같이 산소함량 2.3무게%에 해당하는 바이오알코올 평가시료를 바이오에탄올과 바이오부탄올 간 영향성 검증을 위하여 100:0 (E100), 70:30 (EB70:30), 30:70 (EB30:70), 0:100 (B100)으로 4종을 선정하였다. 이러한 산소함량과 혼합비율에 따른 상관성 분석을 위하여 산소 미함유 휘발유를 비교 대상연료로 선정하였다.

평가항목은 품질 기준 전 항목을 분석하였으며 바이오에탄올, 바이오부탄올 혼합시료를 대상으로 산소함량 기준으로 오차범위 ± 0.1 무게% 이내로 제조하였다⁴⁾.

2.2 평가차량

바이오에탄올 및 바이오부탄올의 최적혼합비 도출을 목적으로 연료에 따른 품질 특성 및 차량별 배출가스를 평가하기 위하여 국내 대표차량을 선정하였다. 평가차량의 선정에 있어서 가장 높은 보급비율을 가지는 자동차사와 차종을 조사한 결과, 당시 현대자동차가 46%로 가장 높았으며 기아자동차 28%, 삼성자동차 14%, 쉘보레가 가장 낮은 12%를 차지하였다. 자동차사별 대표차량 선정(2,000 cc급) 보급 현황을 조사한 결과, 현대자동차(쏘나타; 41,711대), 기아자동차(K5; 28,877대), 삼성자동차(SM5; 15,780대), 쉘보레(말리부; 8,515대)로 현대자동차의 쏘나타가 가장 높은 판매실적을 나타내었다⁴⁾. 이에 Table 2와

같이 높은 판매실적 및 보급비율을 기초로 현대 LF 쏘나타 차량을 선정하여 바이오알코올 혼합비율에 따른 연료적 특성 및 배출 특성을 평가하였다.

2.3 측정장치

차량 성능 및 환경성 평가에 사용된 차대동력계(Chassis Dynamometer - 4WD) 시스템은 Fig. 1와 같이 항온항습실, 차대동력계, driver's aid, 희석터널, 배출가스 분석장치, 보조 운전장치 등으로 구성된 시스템으로 국내 3.5톤 이하의 소형자동차에 대하여 인증된 장비로 배출가스 및 연료소비율을 측정할 수 있도록 형식 승인된 시험 장비이다.

차대동력계는 차량이 실도로 상을 주행할 때의 노상 주행저항과 관성 등을 모의하여 롤러 상에서 세트된 시험차량이 도로 상을 실주행할 때와 비슷한 여건 하에서 운전하도록 하는 기능을 가진다. 배출가스 측정은 시험자동차가 차대동력계의 롤러 위에서 각 모드별로 주행할 때 배기관으로부터 배출되는 가스를 정용량 시료채취장치(constant volume sampler, CVS)로 일정량의 공기를 희석한 후, 시료 채취백에 채취하여 배출가스를 정량 분석한다. 배출가스 분석장치(Mexa-7400LE, Horiba사)는 가솔린/LPG 자동차의 배출가스 중 CO, THC, NOx, CO₂ 등을 분석할 수 있는 장치로서 분석원리는 CO 및 CO₂가 비분산 적외선분석법(nondispersive infrared, NDIR), THC는 열식불꽃이온화검출기법(heated flame ionization de-

Table 2. Selected evaluation vehicles

| | |
|----------------------|--|
| Engine type | Inlined Spark-ignited 4 stroke 4 cylinder engine |
| Supercharging system | Single turbocharger |
| Fuel supply type | Gasoline injector (GDI) |
| Compression ratio | 10.1:1 |
| Max. power | 245 ps/6,000 rpm |
| Max. torque | 36.0 kg·m/4,250 rpm |
| Transmission | AT-6 |
| Aftertreatment | 3 way catalyst |



Fig. 1. Vehicle emission measurement system

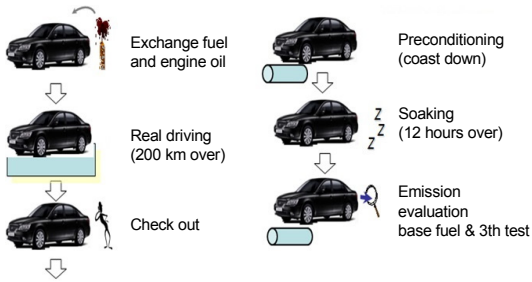


Fig. 2. Fuel efficiency and emission measurement procedures

tector, HFID), NO_x는 화학발광법(chemiluminescence detector, CLD)을 사용하였다. 환경성 평가는 복합모드(CVS-75 모드 및 HWFET 모드)로 실시하였으며 CVS-75 모드 측정 방법은 실온 20-30℃의 시험실 내에서 엔진이 정지된 상태에서 시험차량을 12시간 이상 정차시킨 후(soaking) 엔진이 정지된 상태 그대로 시험차량을 차대동력계상에 위치시켜 상기 CVS-75 모드를 추적하여 차량을 운전하였다. 이 때 차대동력계에는 시험차량이 80.5 km/h로 주행할 때의 도로부하를 재현할 수 있도록 도로 부하력과 아울러 차량중량에 맞춘 등가관성 중량을 설정한다. 고속 주행을 모사한 HWFET 모드는 고속도로의 주행 상황에 맞추어 미국 EPA에서 제정하여 사용하고 있는 시험모드로 차량이 예열된 상태로 고속 주행할 경우에 연비를 측정하기 위하여 개발한 시험모드로 차량 엔진을 고온 상태의 일정 조건으로 설정하기 위하여 시험측정모드 시작 전에 동일한 모드로 예열 과정을 진행한다.

평가연료의 교체 이후 Fig. 2와 같이 200 km 이상을 주행하여 차량 상태를 일치되도록 하였고 다음으로 시험차량을 실도로 상황과 동일한 부하 조건을 설정하기 위하여 차대동력계에서 coastdown을 실시한 후에는 차량의 상태 preconditioning을 수행한다. 이 과정을 거친 시험차량은 실내온도가 20-30℃로 유지되는 시험실내에서 엔진이 정지되어 있고 모든 전기장치가 가동되지 않은 상태에서 12시간 이상 soaking시킨 후 CVS-75 모드 및 HWFET 모드로 차량의 속도를 가감속하여 운전하여 연비, 배출가스 및 미규제 물질을 측정한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 평가연료의 선정 및 연료적 특성

바이오알코올 6부피% 혼합의 기준은 산소함량 2.3무게%에 해당되며 바이오에탄올과 바이오부탄올을 혼합한 연료의 품질을 분석한 결과, 모든 품질 기준을 만족하는 결과로 나타났다. 연소성과 관련된 옥탄가의 경우, 바이오에탄올과 바이오부탄올 간 상반된 결과로 상호보완적인 상관성으로 인하여 품질 기준을 만족시켰다. 차량 엔진에서의 증기압은 연소하기 직전 액상에서 기상으로 전환되는 연료적 특성으로 시동성과 연소성에 큰 영향을 미친다⁶⁻⁸⁾. 다시 말하여 증기압이 특별히 변화되지 않은 특성은 피스톤 내부의 압력 또는 열량(기화열)으로 인한 옥탄가 향상 효과와 상관성이 없는 것으로 추정된다. 다만 바이오알코올이 가지는 연료적 특성 중 옥탄가, 산소함량, 발열량 및 점도는 엔진 연소과정에 일부 영향을 미쳤을 것으로 판단된다⁹⁾. 바이오알코올이 가지는 산소함량과 낮은 발열량은 휘발유 대비 높은 연료소모량(농후한 연소 분위기)을 발생시킨다¹⁰⁻¹²⁾. 이는 알코올에 함유된 산소함량이 인위적으로 공급되면서 차량의 공연비 기준을 맞추기 위하여 분사량을 증가(희박연소→농후한 연소)시키기 때문이다. 하지만 바이오알코올이 가지는 높은 점도는 이러한 증가량을 일정 수준으로 유지시켰을 것이며 이러한 연료적 특성에 의한 변화보다는 바이오알코올이 가지는 이론적 옥탄가에 의하여 증가되었을 것으로 판단된다¹²⁻¹⁴⁾.

3.2 바이오알코올 혼합에 따른 배출가스 변화

3.2.1 배출가스 규제물질 변화

바이오알코올 혼합비율에 따른 일산화탄소 배출 특성 변화를 확인하기 위하여 Fig. 3와 같이 CVS-75 모드로 얻은 일산화탄소의 변화를 확인하였다. 이는 차량 연소과정 중 연료의 불완전한 연소에 따라 발생 가능한 성분으로 바이오부탄올 함량이 증가할수록 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 자동차용 휘

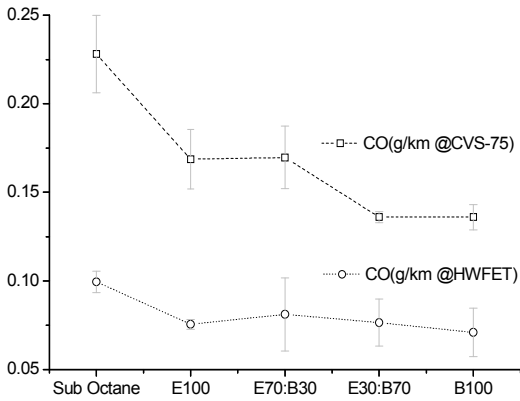


Fig. 3. The CO emission gas along with mixing ratio of bio-alcohol

발유 대비 낮은 일산화탄소의 배출 정도는 뚜렷한 변화를 보이는 반면 바이오알코올 혼합비율에 따른 차이는 반복에 의한 편차 내 결과로 경향성의 여부를 판단하기는 어려웠다.

이는 바이오알코올이 가지는 산소함량에 의한 것으로 산소함량이 적은 자동차용 휘발유에서 보다 높은 일산화탄소를 배출하였으며 산소함량이 증가된 바이오알코올에서는 연소성이 증가하여 일산화탄소를 감소시켰을 것으로 판단된다. 고속주행모드(HWFET)를 통하여 얻은 일산화탄소의 배출 특성은 도심주행 모드와는 다르게 거의 동등 수준으로 나타났으며 이는 안정적인 연소 조건을 가진 상태에서는 산소함량이 특별한 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 도심주행모드에서 다양한 배출가스 성분의 상관성을 나타내었다. 배출가스 중 일산화탄소 및 탄화수소화합물은 바이오부탄올 함량이 높을수록 낮은 배출량을 보인 반면 이산화탄소는 두 성분과 반대되는 경향을 보였다. 앞서 말한 바와 같이 바이오알코올 함유의 산소함량이 보다 높은 연소를 유도한 것으로 판단된다.

연소와 관련하여 높은 산소함량은 보다 안전한 연소 분위기를 만들었을 것이며 이로 인하여 보다 낮은 배출가스를 발생하였다. 일산화탄소, 탄화수소화합물이 발생하는 조건으로는 연소실 내부 연소 조건에 필요한 온도 및 공연비가 최적화되지 않아 발생

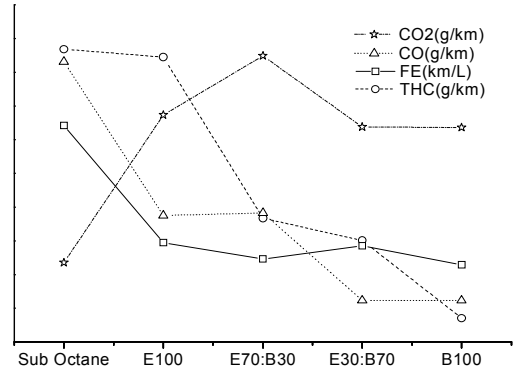


Fig. 4. The correlation of emission gas (at CVS-75 mode)

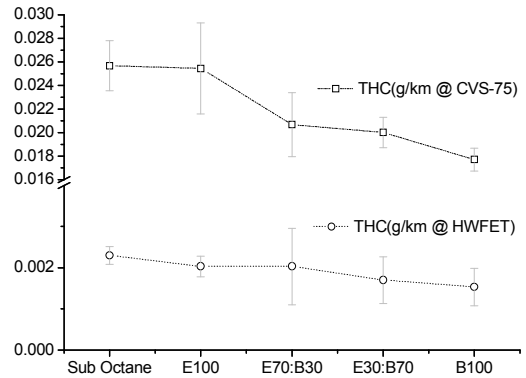


Fig. 5. The THC emission gas along with mixing ratio of bio-alcohol

될 가능성이 가장 높다. 이에 산소가 미함유된 자동차용 휘발유에서 적정 공연비를 맞추기 위하여 보다 많은 공기의 공급이 필요하였으며 이러한 상황은 상대적으로 불완전한 연소를 발생시켰을 것이다. 하지만 바이오알코올이 혼합된 연료에서는 공연비 최적화를 위하여 보다 많은 연료가 공급되었을 것이며 이에 따라 상대적으로 연료소비가 높아졌을 것으로 판단된다. Fig. 5에서와 같이 자동차용 휘발유를 제외하고 바이오에탄올, 바이오부탄올 함량비율에 따른 특별한 경향성은 확인할 수 없었으며 일부 경향은 편차 내 결과로 뚜렷한 변화라고 판단할 수 없었다.

고속주행모드에서 배출가스 특성을 분석한 결과, 안정적 주행 조건에 따른 변화를 확인할 수 있었다. Fig. 5에서와 같이 탄화수소화합물의 경우, 도심주행

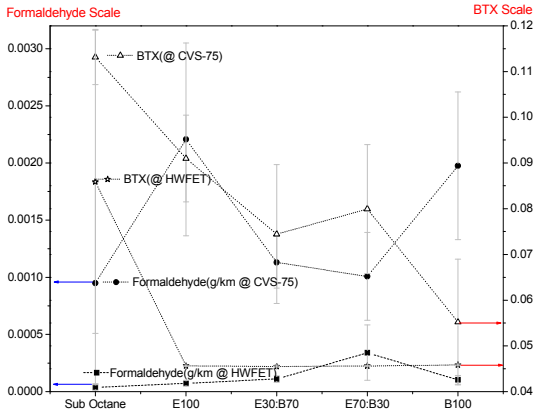


Fig. 6. The HCHO emission gas along with mixing ratio of bio-alcohol

모드(CVS-75)과 고속주행모드(HWFET)의 수치적 비교(y축)를 통하여 탄화수소화합물이 약 10배 이상 감소된 결과를 확인할 수 있었다. 이산화탄소와 일산화탄소의 경우, 고속주행모드에서 약 2배 수준으로 감소되었으며 바이오알코올을 함량비율에 따른 뚜렷한 경향은 확인할 수 없었다.

3.2.2 배출가스 미규제물질 변화

Fig. 6과 같이 규제물질의 분석 조건과 동일하게 평가를 완료하여 바이오알코올 혼합비율에 따른 포름알데이드(Formaldehyde) 및 벤젠, 톨루엔, 자일렌(BTX) 배출 특성을 확인하였다. 두 성분은 발암물질로서 건강 및 환경에 악영향을 미치는 성분으로 다양한 국가에서 유해물질로 지정되어 있다. 또한 다양한 연구 결과를 통하여 에탄올 연소시 알데이드를 발생시킨다는 연구 결과가 있었으나¹⁴⁾ 본 연구에서는 바이오에탄올(약 6부피%), 바이오부탄올(약 10%) 및 혼합연료를 사용하였을 경우, 특별한 증가를 확인할 수 없었다.

4. 결론

자동차용 휘발유의 대체연료로서 바이오에탄올, 바이오부탄올이 상용화될 경우를 고려하여 바이오알코올 혼합비율에 따른 연료적 특성 및 배출 특성을

평가하였다. 이는 함산소제가 없는 자동차용 휘발유를 기초로 바이오에탄올, 바이오부탄올 산소함량 기준까지 혼합하여 주행 조건에서의 배출 특성을 비교하였다.

1) 바이오부탄올 함량이 증가할수록 배출가스(CO, THC)는 전반적으로 감소하는 패턴을 보이는 반면 이산화탄소는 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 이산화탄소의 증가는 연소적 측면에서는 보다 안정적인 연소를 발생시킨 결과라고 판단되나 이와 관련된 연비 측면에서는 뚜렷한 변화를 확인할 수 없었다.

2) 배출가스의 세부적인 분석 결과를 확인하기 위하여 3회 이상으로 평가된 결과를 표준편차와 같이 나타내었으며 전반적으로 반복 허용차 내 결과로 앞서 언급된 패턴의 변화라고 단정지을 수 없다. 또한 고속주행모드인 HWFET 모드에서는 거의 동등한 수준으로 나타났다.

3) 미규제 배출가스 또한 동일한 분석 조건을 적용하여 표준편차와 같이 나타내었다. 하지만 바이오알코올 혼합비율에 따른 일정한 변화는 확인할 수 없었다.

4) 다양한 원인 중 가장 큰 변화는 산소함량에 의한 공연비 변화로 이에 따라 분사량이 미량 증가되었을 것으로 판단된다. 하지만 상대적으로 밀도가 증가되어 일정 부분 상쇄시켰을 것으로 추정된다. 또한 산소함량 기준의 높은 부탄올 함량은 상대적으로 낮은 방향족 및 올레핀 함량을 만들었으며 이에 일부 낮은 배출가스를 만들었을 것으로 판단된다. 또한 완성차 후처리장치 후단에서 발생된 배출가스의 배출 정도는 미미한 수준으로 변별력 또한 반복·허용차 내 결과로 의미를 부여하기는 어려울 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 바이오에탄올, 바이오부탄올, 혼합비율에 따른 연료적 특성을 확인할 수 있었으며 이에 따른 국내 완성차를 대상으로 배출가스 변화를 확인하였다. 연료적 측면에서는 두 성분 간 장·단점을 활용하여 효과적인 연료 품질을 만들 수 있을 것으로 판단되나 혼합비율에 따른 국내 완성차 기준으로 배출가스 특성 변화는 확인할 수는 없었다.

후 기

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

References

1. “Greenhouse gas emissions by 37% from the BAU emission level by 2030”, National Greenhouse Gas Emissions Reduction Roadmap, Korea, 2014.
2. “National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea”, Greenhouse Gas Inventory and Research Center, Korea, 2015.
3. “The 4th Basic New and Renewable Energy Plan”, Ministry of Trade, Industry & Energy, Korea, 2014.
4. 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 Korea Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No.6, 2017, pp. 704-711.
5. “Petroleum and Alternative Fuel Business Act”, Enforced Date 28, No. 14476, 2017.
6. A. Prakash, A. Jones, E. Nelson, J. Macias, E. Jimenez, and M. Hinojosa, “Octane Response of Premium-Recommended Vehicles”, SAE Paper No. 2013-01-0883, 2013.
7. T. Alleman, “Analysis of Ethanol Fuel Blends”, SAE Paper No. 2013-01-9071, 2012.
8. T. J. Wang, “Study on Vaporization and Combustion of Spray in High Pressure Environment”, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2003, p. 55.
9. M. H. Lee, J. R. Kim, K. H. Kim, and J. H. Ha, “A study on the characteristics of fuel performance according to the oxygenated additive type for gasoline fuel Part 1. Fuel properties and evaporative emission characteristics”, Journal of the Korean Oil Chemists' Society, Vol. 33, No.1, 2016, pp. 118-128.
10. S. H. Youn, D. S. Kim, and C. S. Lee, “Effect of Ethanol-gasoline blending ratio on lean combustion and Exhaust Emissions Characteristics in a SI Engine Fueled with Bioethanol”, Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 19, No. 1, 2011, pp. 358-364.
11. 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, 2004, pp. 7093-7100.
12. 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, 2002, pp. 403-410.
13. 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, 2007, pp. 428-433.
14. T. A. Thummadetsak, S. Tunyapisetsak, and T. Kimura, “Effect of Gasoline Compositions and Properties on Tailpipe Emission of Currently Existing vehicles in Thailand”, SAE Paper, Vol. 1, 1991, p. 3570.