

저농도 바이오알코올 혼합에 따른 스파크 점화 엔진 청정 특성 연구

차규섭^{1,2,†} · 노수영²

¹GS칼텍스(주) 기술연구소, ²충북대학교 바이오시스템공학과

A Study on the Characteristics of Spark Ignition Engine Cleanliness by Low Level Bio-Alcohol Blending

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, Chungdae-ro 1, Seowon-gu, Cheongju 28644, Korea

†Corresponding author :
autocha@gscaltex.com

Received 29 September, 2019

Revised 21 October, 2019

Accepted 31 October, 2019

Abstract >> A comparative evaluation of engine cleanliness was performed on the transport gasoline blended with bio-alcohols, and this study was considered to achieve the aim of greenhouse gas reduction in Korea. In particular, the fuel blended with bio-ethanol and bio-butanol showed the best engine cleaning performance both on combustion chamber deposits and intake valve deposits. The deposit control gasoline additive was effective to remove intake valve deposits. In contrast, the amount of combustion chamber deposits were tend to increase even though fuels blended with bio-alcohols were used. In overall, fuels blended with bio-alcohols, compared to fossil fuels, still showed outstanding performance in terms of engine cleanliness.

Key words : Bio-alcohol(바이오알코올), Bio-ethanol(바이오에탄올), Bio-butanol(바이오부탄올), Engine cleanliness(엔진청정성), Intake valve deposit(흡기밸브퇴적물), Combustion chamber deposit(연소실퇴적물)

1. 서론

세계적으로 석유 및 석탄 등 화석에너지의 고갈과 가격 상승, 지구온난화와 에너지 안보 문제로 신재생 에너지의 개발, 보급이 확대되고 있으며 특히 수송용 연료 분야에서 바이오연료를 적극적으로 도입하고 있다. 우리나라의 경우 온실가스 저감을 위하여 35년 신재생에너지 보급비율 11% 달성¹⁾과 신기후변화체제 대응을 위한 국가 온실가스 감축 목표인 2030년

배출전망치(business as usual, BAU) 대비 37% 달성을 목표로 하고 있다.²⁾ 바이오연료는 다른 신재생에너지와 비교하여 기존 인프라의 변경, 추가 없이 사용할 수 있는 장점³⁾이 있어 국가 신재생에너지 보급과 온실가스 저감 목표 달성을 위한 가장 현실적인 대안이 될 수 있다. 국내 바이오연료 보급정책은 2015년 신재생연료 의무혼합제도인 renewable fuel standard (RFS)를 수립한 후 2019년 기준으로 수송용 경유에 바이오디젤 3% 혼합을 의무화하고 있다. 하

지만 바이오연료 의무혼합제도를 실시하고 있는 대부분의 국가에서는 휘발유에 바이오알코올 연료를 혼합하고 있는 것에 반하여 국내에서는 아직 휘발유 제품에 대한 바이오연료 혼합 의무화가 시행되지 못하고 있어 신재생에너지 사용 및 온실가스 감축 목표 달성을 위하여 유에 바이오알코올 연료 혼합 확대 정책이 필요한 실정이다.

휘발유 제품에 사용되는 대표적인 바이오알코올은 바이오에탄올로서 2017년 기준으로 약 270억 리터의 연료용 바이오에탄올이 생산되었다⁴⁾. 부탄올의 경우 에탄올 대비 뛰어난 연료 특성으로 에탄올을 대신할 차세대 바이오연료로 주목을 받아 2000년대 중반부터 BP-DuPont, Gevo, Green Biologics사 등 여러 업체에서 개발을 진행하고 있다⁵⁾.

최근에는 에탄올과 부탄올을 혼합한 혼합 알코올 연료에 대한 연료특성 분석 연구⁶⁾도 진행되었으나, 기존에 진행된 연구 대부분은 알코올 혼합 연료의 연료 특성 분석이나 엔진 및 차량 평가를 통한 연소 특성⁷⁻¹⁶⁾ 분석에 초점을 맞추고 있다.

스파크 점화 엔진의 연소에 있어 또 다른 특성 중 하나인 엔진 청정성에 있어 청정성이 나쁜 연료를 장시간 사용할 경우 흡기밸브¹⁷⁾와 연소실 내 과도한 퇴적물¹⁸⁾이 생성되어 냉시동성 약화, 유해 배출가스 증가, 출력 및 연비 손실 등의 문제를 일으킬 수 있는데, 바이오알코올 혼합 연료를 사용한 엔진 청정성 연구는 현재 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 저농도 알코올 혼합연료를 사용하여 실제 차량 엔진에서의 흡기밸브와 연소실 퇴적물 생성 특성 분석을 통하여 화석연료인 휘발유 대비 수송용 친환경 대체 연료로서 바이오알코올 혼합 연료의 엔진 청정 성능을 비교 검증하고자 한다.

2. 실험

2.1 평가시료

실험에 사용된 시료는 합산소기제(methyl tert-butyl ether, MTBE 등)가 혼합되지 않아 상대적으로 옥

탄가(research octane number, RON)가 낮게 제조된 sub octane gasoline에 바이오에탄올과 바이오부탄올을 활용하여 석유 및 석유대체연료 사업법상 자동차용 품질기준¹⁹⁾을 만족할 수 있도록 바이오알코올을 혼합 제조하였다.

제품의 혼합기준은 탄소-산소-수소 구조 중 산소 함량 2.3무게% 이하 규격에 해당되는 바이오에탄올 6% (E6, bio-ethanol 6%+sub octane gasoline 94%)를 혼합한 연료와 이를 기준으로 상대적인 성능 비교를 위하여 바이오부탄올 6% (B6, bio-butanol 6%+sub octane gasoline 94%), 바이오에탄올과 바이오부탄올 혼합 알코올 시료의 경우 운전성지수²⁰⁾와 물성 측면에서 상대적으로 가장 좋은 것으로 예측된 비율인 바이오에탄올 7과 바이오부탄올 3의 비율로 혼합한 알코올 연료 6% (EB6, bio-ethanol7 : bio-butanol3 6%+sub octane gasoline 94%)⁶⁾, 현재 국내 유통 휘발유 제품에 혼합되어 사용되고 있는 합산소제인 MTBE 8%를 혼합한 연료(E6 동등 수준의 옥탄가)를 포함하여 5종의 연료에 독일 BASF사의 상용 판매 제품인 polyisobutylene amine (PIBA) 계열의 엔진청정성 첨가제 주입 유무를 포함하여 총 10종의 시료를 준비하였다.

각 시료의 주요 물성 분석 결과는 Table 1과 같으며, 소량의 엔진청정성 첨가제 주입(300 vol.ppm) 후 시료 물성은 일반적으로 주입 전과 동일하므로 첨가제 주입 시료에 대한 별도의 물성 분석은 진행하지 않았다.

2.2 시험방법

2.2.1 평가엔진

시험용 엔진은 국내 주요 정유사 및 자동차부품연구원에서 엔진청정성 시험 엔진으로 사용 중인 현대 자동차의 세타 엔진을 사용하였으며 엔진 주요 Spec.은 Table 2와 같다.

2.2.2 측정장치

측정을 위한 장치로는 엔진 내구 시험 운전 방법

Table 1. The properties of evaluation samples

| Spec. name | | Sub octane | Ethanol 6% | Butanol 6% | EB (E7: B3) 6% | MTBE 8% |
|-----------------------------------|----------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|
| Density, @15°C, kg/m ³ | | 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 |
| | Residue (vol%) | 0.9 | 0.9 | 1.2 | 0.6 | 1.1 |
| Washed/unwashed gun, mg/100ml | | 0.5/1.2 | less than 0.2/0.2 | less than 0.2/0.2 | less than 0.2/0.2 | 0.6/1.2 |
| 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 | 11,018.3 | 10,925.5 | 10,946.9 | 11,023.1 |
| RVP (37.8°C, kPa) | | 58.6 | 66.0 | 56.7 | 63.9 | 59.9 |
| Sulfur (wtppm) | | 8.59 | 7.8 | 7.89 | 7.89 | 7.34 |
| Oxidation stability (min) | | 480 + | 480 + | 480 + | 480 + | 480 + |
| 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 |
| Benzene (vol%) | | 0.58 | 0.55 | 0.54 | 0.55 | 0.54 |
| Toluene (vol%) | | 2.93 | 2.77 | 2.75 | 2.76 | 2.7 |
| C8 aromatics (vol%) | | 4 | 3.78 | 3.75 | 3.77 | 3.68 |
| C9 aromatics (vol%) | | 4.46 | 4.23 | 4.19 | 4.22 | 4.12 |
| C10+ aromatics (vol%) | | 1.4 | 1.32 | 1.31 | 1.31 | 1.27 |

Table 2. Specification of experimental engine

| | |
|--------------------|--|
| Type | Inlined spark-ignited 4 stroke 4cylinder engine |
| Displacement | 1,988 cc |
| Valve mechanism | DOHC (direct attack with hydraulic tappets) |
| Bore × stroke | 86.0 mm × 86.0 mm |
| Compression ratio | 10.5:1 |
| Max. power | 144 ps/6,000 rpm |
| Max. torque | 19.1 kg·m/4,250 rpm |
| Combustion chamber | Pent roof |
| Piston head | Flat |
| Intake charging | Naturally aspirated |

을 통한 분석을 위하여 Fig. 1의 오스트리아 AVL사의 엔진동력계(EC240 kW)를 사용하였다.

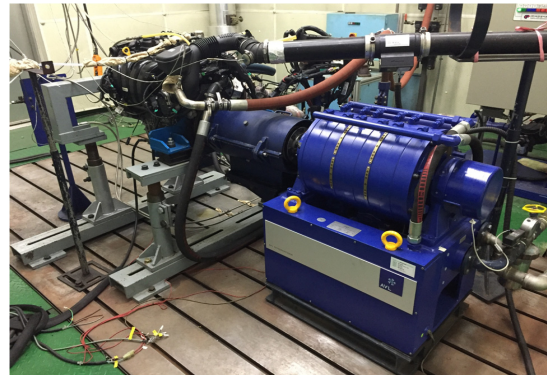


Fig. 1. AVL list GmbH EC 240 kW engine dynamometer

또한, 청정성 측정 항목 중 deposit 두께 측정에 사용된 장비는 도막두께 측정기로서 비자성 금속 위의 절연피막 측정에 사용되는 고주파 와전류방식을 채용한 장치(일본 KETT사 제품)를 이용하여 측정하였

으며 제품 사양은 Table 3과 같다.

2.2.3 평가모드

미국이나 유럽의 경우 일찍이 엔진 퇴적물이 엔진에 미치는 문제점과 이러한 퇴적물을 제어하기 위한 첨가제 성능 평가 방법에 대한 연구가 다양하게 진행되어 미국의 경우 미국재료시험학회(ASTM), 유럽의 경우 연료 및 윤활유 성능 시험 개발을 위한 합동위원회(CEC)에서 표준 시험방법을 제정하여 공인 시험방법으로 준용되고 있다²¹⁻²⁴⁾.

국내의 경우 최근에 들어 한국석유관리원에서 국내 실정에 맞는 엔진 퇴적물 성능 평가방법에 대한 시험법 정립 및 표준화를 위한 연구를 진행 중에 있으나, 아직까지 국내 공인 시험방법이 마련되어 있지 않은 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 국내 정유 업계에서의 다년간의 시험 경험을 토대로 엔진다이아노미터를 활용한 시험법인 미국 ASTM D6201을 국내 생산 엔진에 맞게 일부 수정하여 엔진 청정성 시험을 진행하였다.

Table 3. Specification of coating thickness Tester

| | |
|-----------------------|--|
| Model | LH-200J |
| Measurement format | Eddy-current |
| Object of measurement | Insulating coatings on non-magnetic metal substrates |
| Measurement range | 0-800 μm or 32.00 mils |
| Measurement precision | Under 50 μm : $\pm 1 \mu\text{m}$ (absolute error) 50 μm or greater: $\pm 3\%$ (relative error) |

Table 4. Test mode

| Stage | Engine speed (rpm) | Engine torque (N·m) | Time (min.) |
|-------|--------------------|---------------------|-------------|
| 1 | 2,000 | 23 | 4 |
| 2 | 2,800 | 86 | 8 |

엔진 시험모드는 Table 4와 같이 한 사이클을 구성하여 100시간 연속 운전을 수행하였다.

엔진의 크랭크축과 동력계는 직결하여 부하를 제어하면서 토크를 측정하였으며, 냉각수 및 엔진오일 공급 조절 장치를 이용하여 엔진으로 들어가는 냉각수 온도는 $90\pm 3^\circ\text{C}$, 엔진오일은 $101\pm 3^\circ\text{C}$, 흡기온도는 $32\pm 3^\circ\text{C}$ 로 제어하였다.

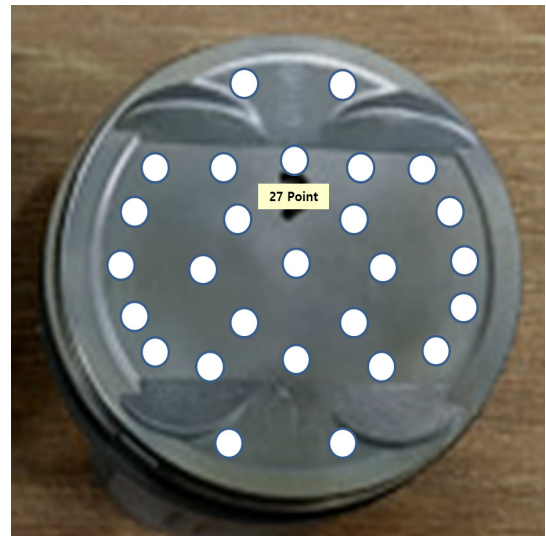


Fig. 2. Piston top deposit thickness measuring point

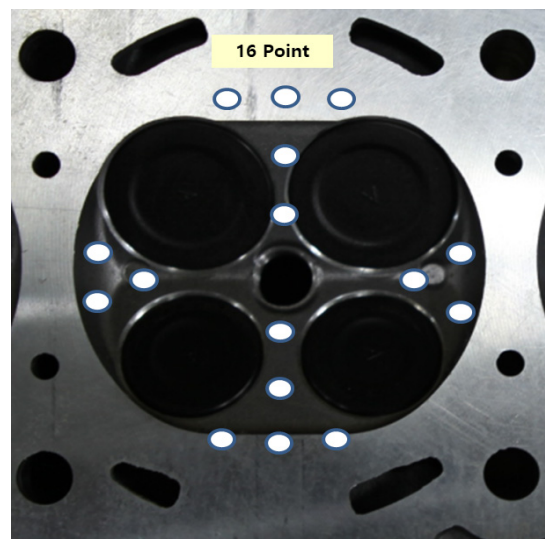


Fig. 3. Cylinder head deposit thickness measuring point

시험용 엔진은 시험 진행 전 실린더 헤드를 분리하고 밸브 분해 후 각 부품의 사진 촬영을 진행하였으며 흡기밸브 및 실린더 헤드 구성품은 매 시험마다 신품으로 교체 사용하였다. 흡기밸브의 경우 조립 전에 정밀 저울을 사용하여 무게를 측정하였으며 시험 후 다시 분해하여 무게를 측정함으로써 흡기밸브 퇴적물의 양을 측정하였다. 또한, 연소실 퇴적물의 경우 엔진을 충분히 식힌 다음 각 실린더별로 실린더 헤드부 및 피스톤 상단부 퇴적물의 두께를 먼저 측정하였으며 이후 브러쉬로 깨끗이 긁어서 연소실 퇴적물 양의 무게를 측정하였다. 여기서 시험 연료별 퇴적물의 양은 시험 엔진의 흡기밸브 및 연소실 퇴

적물의 평균치를 사용하여 비교하였다.

연소실 내 퇴적물 두께 측정 위치는 Fig. 2 및 Fig. 3과 같으며 가능한 전체 연소실 내 퇴적물층을 대표할 수 있는 부위를 포함하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 평가 연료의 연료적 특성

평가에 사용된 연료는 석유 및 석유대체연료 사업법상 자동차용 품질기준을 모두 만족하는 제품으로서 옥탄가(ROK)는 바이오에탄올 자체의 높은 이론

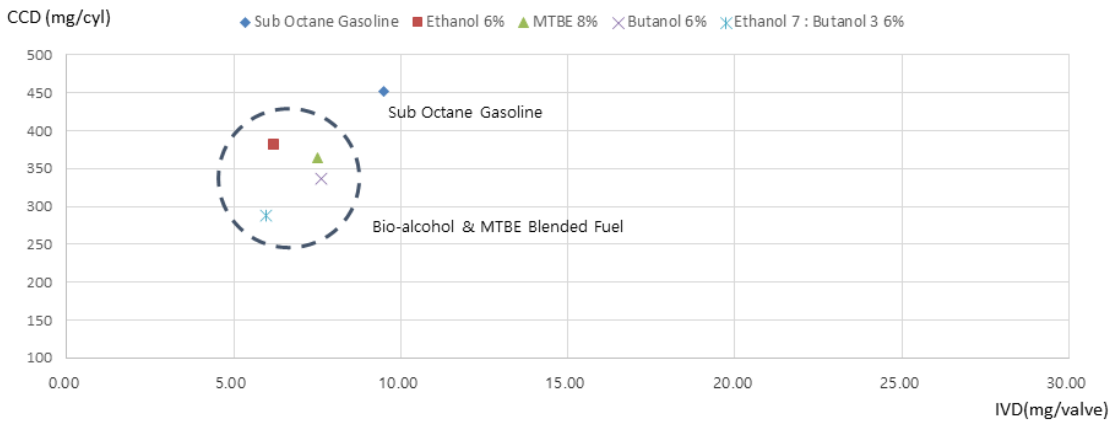


Fig. 4. Intake valve deposit vs. combustion chamber deposit (with deposit control gasoline additive)

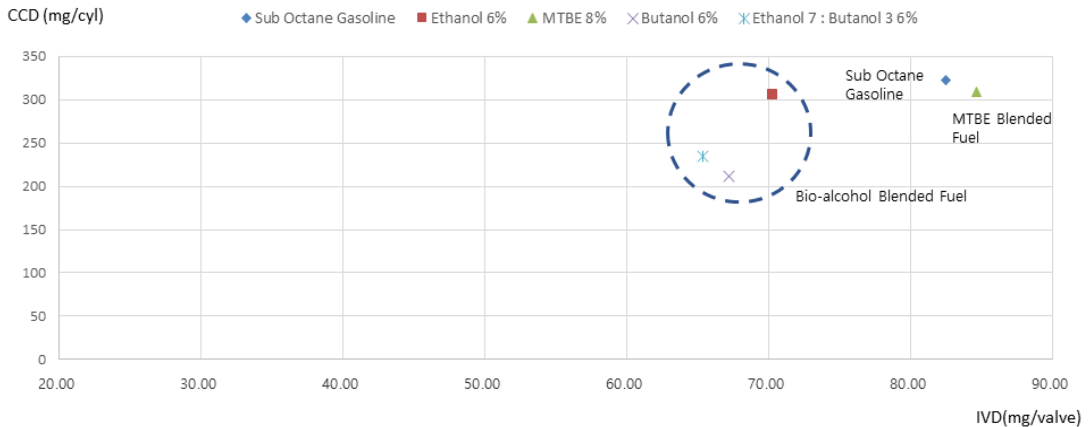


Fig. 5. Intake valve deposit vs. combustion chamber deposit (without deposit control gasoline additive)

적 RON (111 수준)으로 인하여 평가 대상 연료 중 E6 제품이 가장 높게 나타났다.

엔진 청정성과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려진 물질인 올레핀²⁵⁾과 고비점 방향족(C10+ aromatics) 성분 및 gum의 경우 sub octane gasoline 대비 바이오알코올의 첨가분에 의하여 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 이는 엔진 청정성 평가에서 sub octane gasoline보다 우수한 결과를 나타낼 수 있는 하나의 인자가 될 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 바이오알코올 혼합에 따른 엔진 청정 특성

3.2.1 흡기 및 연소실 퇴적물 무게 변화

Fig. 4와 같이 평가 시료에 엔진청정성 첨가제를 주입한 경우 base (sub octane gasoline) 대비 바이오알코올 혼합 연료 및 MTBE 혼합 연료는 흡기밸브와 연소실 퇴적물에서 전체적으로 우위를 나타내었으며, 바이오에탄올과 바이오부탄올을 7:3 비율로 6% 혼합한 EB6 연료에서 상대적으로 가장 우수한 엔진 청정성능을 나타내었다.

Fig. 5의 경우 엔진청정성 첨가제를 주입하지 않은 경우로 첨가제를 주입하였을 경우와 마찬가지로 바이오알코올 혼합연료가 흡기밸브와 연소실 퇴적물에서 전반적으로 우위를 나타내었다. 반면 MTBE를 혼합한 경우 sub octane gasoline과 큰 차이를 보이지

않는 것으로 나타났으며 이는 바이오알코올 혼합 연료가 엔진 청정성 측면에서 보다 뛰어난 효과를 가진 것으로 보인다. 또한, 바이오알코올 연료에 첨가제를 주입한 경우와 마찬가지로 바이오에탄올과 바이오부탄올을 7:3 비율로 혼합한 EB6 연료에서 상대적으로 가장 우수한 엔진청정성능을 나타내었다. EB6 연료가 E6나 B6 연료 대비 상대적으로 가장 좋은 청정성을 보인 것은 Table 1의 물질 분석 결과에 나타나 있는 바와 같이 distillation 후 남은 가장 적은 양의 고비점 residue와 상대적으로 높은 산소함량을 가진 연료 물성에 의한 영향으로 추정된다.

첨가제 주입 전후를 비교시 연소실 퇴적물의 경우 첨가제를 주입하였을 경우가 첨가제를 주입하지 않았을 경우보다 상대적으로 높은 값을 보이는데, 이는 고분자의 청정성 첨가제가 연소실에서 완전히 연소

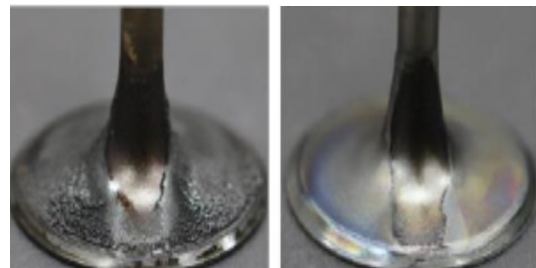


Fig. 6. Ethanol 6% intake valve deposit (without vs. with additive)

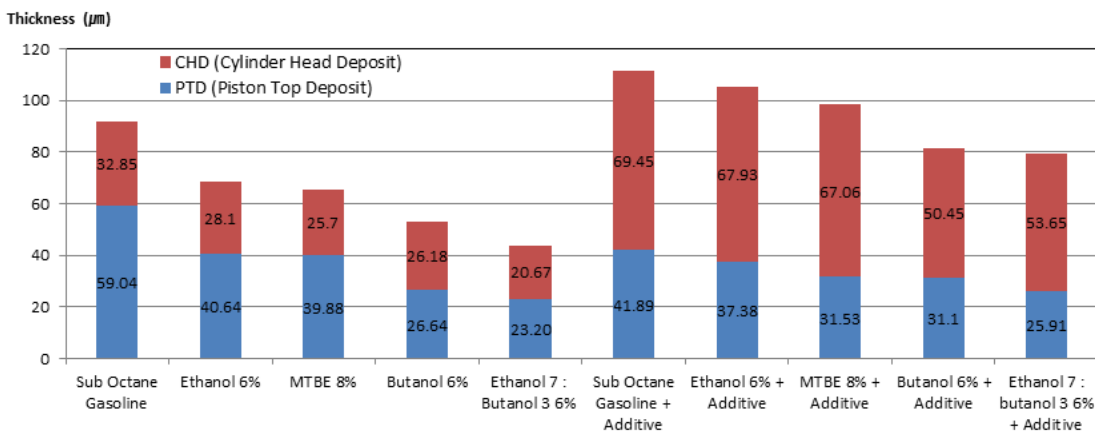


Fig. 7. Thickness results of combustion chamber deposit

되지 못하고 일부가 연소실 내부에 축적되면서 일어나는 현상 때문으로 추정된다.

엔진청정성 첨가제를 주입한 경우 첨가제를 주입하지 않은 경우보다 엔진청정성 측면에서 가장 중요한 흡기밸브 퇴적물이 Fig. 6에서 보는 바와 같이 큰 폭으로 개선되는 효과를 보여 주었다. 이는 휘발유 엔진에서 향후 바이오알코올 혼합 연료를 사용하더라도 필드에서 엔진 성능 저하(연비 악화, 배출가스 증가, valve sticking, octane requirement increase 등)를 미연에 방지하기 위해서는 엔진청정성 첨가제의 추가 주입이 필요할 것으로 판단된다.

3.2.2 연소실 퇴적물 두께 변화

Fig. 7과 같이 연소실 퇴적물의 두께 변화 또한 EB 6% 혼합 연료의 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다으며, 연소실 퇴적물 무게 변화의 경우와 동일한 경향을 보여 주고 있다.

첨가제 주입 전 혼합 연료의 경우 피스톤 상단의 퇴적물이 실린더헤드 상의 퇴적물보다 높은 결과를 보였으나, 첨가제를 주입한 경우는 반대의 결과를 보여 주는데 이는 혼합기내에 포함된 청정성 첨가제의 효과로 인하여 피스톤 상단의 퇴적물 일부는 씻겨 나가서 퇴적물 두께가 동등하거나 저감되는 경향을 보여주지만 실린더 헤드부에 부착된 퇴적물의 경우 완전 연소되지 못한 고분자의 첨가제 일부가 배기밸브를 통해 빠져나가지 못하면서 생기는 현상으로 추정된다.

4. 결론

본 연구는 수송분야 휘발유의 대체 연료로서 바이오알코올을 혼합 연료가 엔진 청정성에 미치는 영향을 검토하고 엔진 청정성 첨가제 주입 유무에 따른 효과까지 평가하였다.

1) 합산소 기제인 바이오알코올과 MTBE 혼합에 의한 희석 효과로 엔진 청정성과 관련된 밀접한 물질인 올레핀과 고비점 방향족(C10+ aromatics) 성분 그리고 gum이 sub octane gasoline 대비 상대적으로

낮은 값을 나타냄을 확인할 수 있었다.

2) 흡기 및 연소실 퇴적물의 무게는 엔진청정성 첨가제 주입 유무와 상관없이 바이오알코올 혼합 연료의 엔진청정성이 전반적으로 우위를 나타내었으며, 바이오에탄올과 바이오부탄올을 7:3 비율로 혼합한 EB 6 연료에서 가장 우수한 엔진 청정성을 나타내었다.

3) 연소실 퇴적물 두께 변화를 확인한 결과 연소실 무게 변화와 동일하게 바이오알코올 혼합연료가 우수한 결과를 보여주었다.

4) 엔진청정성 첨가제의 경우 흡기밸브 퇴적물 제거에는 효과적이거나, 바이오알코올 혼합 연료를 사용하더라도 연소실 퇴적물은 상대적으로 증가되는 경향을 보여주었다. 하지만 기존 화석계 연료에 대비해서는 전반적으로 우수한 청정 성능을 나타내었다.

후 기

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

References

1. “The 4th Basic New and Renewable Energy Plan”, 2014, Ministry of Trade, Industry & Energy.
2. “Greenhouse gas emissions by 37% from the BAU emission level by 2030”, National Greenhouse Gas Emissions Reduction Roadmap, Korea, 2014.
3. 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.
4. A. Delgado, L. F. Cosío, G. S. Nuñez, D. A. Plaza, M. Arrizon and J. Gschaedler, “Comparative of Lignocellulosic Ethanol Production by *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces cerevisiae*”, Special Topics in Renewable Energy Systems, Vol. 1, 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78685>.
5. 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.

6. 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>.
7. S. H. Yoon, 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", *Trans. of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 19, No. 1, 2011, pp. 82-88.
8. D. Y. Lee, M. Y. Kim, S. Y. Ha, H. G. Roh, and C. S. Lee, "Combustion and Emission Characteristics of a S. I. Engine Fueled with Ethanol Gasoline Blended Fuel", *Fall Conference Proceedings, KSAE*, Vol. 1, 2007, pp. 428-433.
9. C. W. Wu, R. H. Chen, J. Y. Pu, and T. H. Lin, "The Influence of Air-Fuel Ratio on Engine Performace and Pollutant Emission of an SI Engine Using Ethanol-Gasoline Blended Fuels", *Atmospheric Environment*, Vol. 38, 2004, pp. 7093-7100, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.058>.
10. D. H. Kim, J. M. Lee, E. H. Park, J. H. Song and S. I. Park, "Engine Performance and Toxic Gas Analysis of Biobutanol-blended Gasoline as a Vehicle Fuel", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 12, No. 3, 2011, pp. 409-416, doi: <https://doi.org/10.1007/s12239-011-0048-2>.
11. J. Yang, X. Yang, J. Liu, Z. Han and Z. Zhong, "Dyno Test Investigations of Gasoline Engine Fueled with Butanol-Gasoline Blends", *SAE Paper 2009-01-1891*, 2009, doi: <https://doi.org/10.4271/2009-01-1891>.
12. S. G. Pouloupoulos, D. P. Samaras and C. J. Philippopoulos, "Regulated and unregulated emissions from an internal combustion engine operating on ethanol-containing fuels", *Atmospheric Environment*, Vol. 35, No. 26, 2001, pp. 4399-4406, doi: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00248-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00248-5).
13. H. Bayraktar, "Experimental and theoretical investigation of using gasoline-ethanol blends in spark-ignition engines", *Renewable Energy*, Vol. 30, No. 11, 2005, pp. 1733-1747, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.01.006>.
14. 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>.
15. 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, No. 3, 2002, pp. 403-410, doi: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00508-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00508-8).
16. J. Dernote, C. M. Rousselle, F. Halter and P. Seers, "Evaluation of butanol-gasoline blends in a port fuel-injection, spark-ignition engine", *Oil & Gas Science and Technology-Revue de l'Institut Français du Pétrole*, Vol. 65, No. 2, 2010, pp. 345-351, doi: <https://doi.org/10.2516/ogst/2009034>.
17. R. C. Tupa and D. E. Kochler, "Intake Valve Deposit-Effect of Engines, Fuel & Additives", *SAE 881645*, 1988, doi: <https://doi.org/10.4271/881645>.
18. G. T. Kalghatgi, "Combustion Chamber Deposits in Spark Ignition Engines: A Literature Review", *SAE Technical Paper 952443*, Vol. 104, 1995, pp. 1349-1363.
19. "Petroleum and Alternative Fuel Business Act", *Enforced Date 28, 2017*, No. 14476.
20. "5th world wide fuel chart", 2013, p. 31.
21. "Standard Test Method for Vehicle Evaluation of Unleaded Automotive Spark-Ignition Engine Fuel for Intake Valve Deposit Formation", *ASTM D5500*.
22. "Standard Test Method for Dynamometer Evaluation of Unleaded Spark-Ignition Engine Fuel for Intake Valve Deposit Formation" *ASTM D6201-18a*. Retrieved from <https://www.astm.org/standards/D6201.htm>.
23. "Inlet Valve Cleanliness in the MB M102E Engine" *CEC F-05-93*. Retrieved from https://www.cectests.org/listdocty peforsale1.asp?subdoc_type=Fuels.
24. Environmental Protection Agency, 40 CFR Part 80 "Regulation of Fuels and Fuel Additives: Certification Standards for Deposit Control Gasoline Additives; Final Rule", *Federal Register Part II*, July 5, 1996. Retrieved from <https://ecfr.io/Title-40/pt40.19.80>.
25. J. Ansomboon, A. Wuttimonkolchai, S. Pannoi, and K. Fukuda, "Chracterization of Deposits and Effects of Detergent Additive, Olefin Content and Engine Oil on Intake Valve Deposit Formation", *SAE Paper 2000-01-2856*, 2000, doi: <https://doi.org/10.4271/2000-01-2856>.