

1.0 L T-GDI FFV 엔진의 성능 개선을 위한 실험적 연구

유준상¹⁾ · 조용석²⁾ · 이태용¹⁾ · 정한샘¹⁾ · 민병혁³⁾ · 서주형³⁾국민대학교 자동차공학전문대학원¹⁾ · 국민대학교 자동차공학과²⁾ · 현대자동차 엔진성능시험팀³⁾

Experimental Study on Performance Improvement of 1.0 L T-GDI FFV Engine

Junsang Yoo¹⁾ · Yongseok Cho^{*2)} · Taeyong Lee¹⁾ · Hansaem Jeong¹⁾ · Byounghyounk Min³⁾ · Juhyeong Seo³⁾¹⁾Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 02707, Korea²⁾Department of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 02707, Korea³⁾Engine Performance Test Team, Hyundai Motor Company, 150 Hyundaiyeonguso-ro, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi 18280, Korea

(Received 31 March 2020 / Revised 15 July 2021 / Accepted 16 July 2021)

Abstract : The FFV engine technology that uses ethanol is emerging as a new paradigm for an alternative energy powertrain. In this study, the combustion and performance characteristics of a 1.0 L TGDI-FFV engine were analyzed when gasoline-ethanol fuels with various blending ratios were used. Under the test conditions, engine performance improved after optimizing the spark timing. In particular, improvements in the torque of E30 and E50 fuels were 5.3 % and 7.8 %, respectively, without affecting combustion stability. The ignition timing of the E30 and E50 fuels was further advanced from the stock timing, reducing BSFC by about 3.6 % for E30 fuel, and 6.8 % for E50 fuel. Optimization of the combustion characteristics was possible with the ignition timing control to MBT for the FFV engine, resulting in improved torque and BSFC. Consequently, the authors suggest the necessity of improving the spark timing control strategy for the FFV engine.

Key words : Ethanol(에탄올), Gasoline(가솔린), Flexible fuel vehicle(FFV, 가변연료차량), Octane number(옥탄가), Spark timing(점화시기)

Subscripts

FFV : flexible fuel vehicle

ROHR : rate of heat release

MFB : mass fraction burned

CA50 : crank angle at 50 % burn point

BSFC : brake specific fuel consumption

1. 서론

대체 에너지는 지구 온난화를 방지하기 위해 각광을 받고 있다. 풍력, 태양열, 수력 및 지열과 같은 지속 가능한 에너지원과 다양한 바이오매스로 만들어진 바이오 연료 사용이 중요해지고 있다.¹⁾ 운송 분야에서는 CO₂ 규제에 대응하기 위하여 에탄올에 대한 연구를 많이 진행하고 있다. 에탄올은 가솔린에 비해 CO₂ 배출량이 적고, 옥탄가가 높은 특성을 갖고 있기 때문에 20세기 초부터 가솔린 엔진의 대체 연료로 제안되었다.²⁻⁵⁾

Anderson 등⁶⁾은 에탄올 혼합 비율과 옥탄가에 관한 연구결과를 발표하였다. 그는 옥탄가가 에탄올 함량이 증가할수록 비선형적으로 증가한다고 발표하였다. 그리고 다른 연구에서 옥탄가와 에탄올 함량 사이의 관계를 에탄올 체적비가 아닌 에탄올의 몰 농도로 계산하여 선형적인 관계를 보여주는 공식을 발표하였다.⁷⁾

우리는 이전 연구에서 1.6 L 자연흡기 MPI FFV 엔진의 점화시기 제어에 관한 연구를 진행하였다. 당시 엔진의 점화시기 제어 방식은 Fig. 1에 나타났다. 이 FFV 엔진의 혼합 연료별 점화시기는 가솔린과 E100 연료의 최적 점화시기 값들에 선형보간법을 적용하여 결정하였다. 이러한 제어 방식을 사용하는 경우 에탄올 함량별 최적의 성능과 효율을 구현할 수 없다는 사실을 발견하였고, 시험 및 분석을 통해 1.6 L 자연흡기 MPI 엔진의 점화시기 최적화 로직을 도출하여 엔진 효율 및 성능을 개선할 수 있었다.⁸⁾

*Corresponding author, E-mail: yscho@kookmin.ac.kr

[†]This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

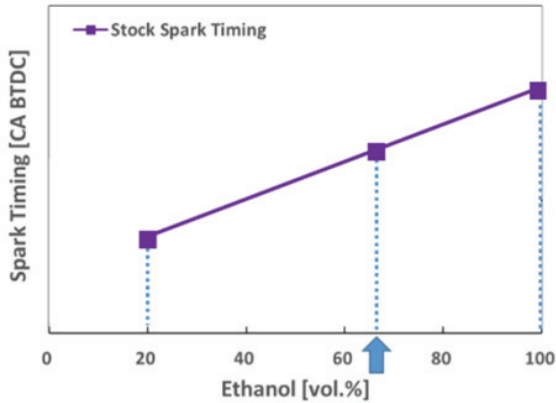


Fig. 1 Stock spark timing of 1.6 L FFV engine

Kenneth 등⁹⁾은 에탄올의 증발 잠열이 크기 때문에 실린더 내 분위기 온도가 많이 감소한다고 보고하였다. MPI 엔진과 다르게 GDI의 엔진의 경우 기화되지 않은 연료를 실린더 내부에 직분사하기 때문에 그 영향이 더 클 것으로 판단된다.

본 연구에서는 1.0 L T-GDI FFV 엔진의 성능 향상을 위한 실험을 진행하였으며, 이전 연구의 1.6 L 자연흡기 엔진과 차이를 비교 분석해 보았다. 1.0 L T-GDI 엔진에는 이전 연구에서 사용되었던 1.6 L 자연흡기 MPI FFV 엔진의 보간법 점화시기 로직과 다르게 비선형적으로 제어하는 로직이 적용되어 있으며, 이는 엔진의 효율을 높이기 위한 것으로 판단된다. 로직은 옥탄가 RON92를 사용하는 지역 및 E27(RON92)~E100 연료를 사용하는 브라질 시장을 모두 대응 가능한 것으로 판단된다. 본 연구를 통하여 엔진 성능 및 효율 개선의 가능성을 분석해 봄으로써 글로벌 시장용 로직으로 확대 적용할 수 있는지 조사해 보았다.

2. 실험 장비 및 실험조건

1.0 L T-GDI FFV 엔진의 성능 및 연소 특성을 파악하기 위하여 엔진 테스트 벤치를 구축하여 실험을 진행하였다.

2.1 대상 엔진

대상 엔진은 실린더 보어 71 mm, 스트로크 84 mm, 압축비 10.5의 3기통 1.0 L T-GDI 엔진이며, 사진과 주요 제원은 Table 1과 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 실험조건

대상 엔진에서 FFV 연료별 점화시기 변경에 따른 연소 특성을 파악하였다. 연소 특성을 파악하기 위한 실험

Table 1 Specifications of 1.0 L T-GDI FFV engine

Description	Specifications
Type	4-stroke T-GDI
Number of cylinder	Inline 3-cylinder
Bore (mm)	71
Stroke (mm)	84
Displacement volume (cc)	998
Compression ratio	10.5



Fig. 2 Photograph of 1.0 L T-GDI FFV engine

Table 2 Experimental conditions

Fuel	Stoichiometric air-fuel ratio	Engine speed (rpm)	Load (%)	Coolant temp. (°C)
E0	14.7	2,000	20	90±2
E30	12.9		40	
E50	11.7		60	
			80	
E100	8.5		100	
		120		

조건으로 엔진 회전 속도는 2,000 rpm, 부하는 공기량 (Amount of air) 20~120 % 사이를 20 % 간격으로 설정하였다. 상세한 실험 조건은 Table 2에 나타내었다. 공기량은 총 실린더의 체적에 실제로 충전된 공기 비율을 나타낸다.¹⁰⁾

E100 연료로 4.9 %의 물을 함유한 100 % 유수 에탄올을 사용하였다. E30 및 E50 연료는 무수에탄올과 가솔린을 체적비로 혼합하여 사용하였다. 예를 들어, E30은 30 % 체적의 에탄올과 70 % 체적의 가솔린을 혼합한 연료이다. E0은 가솔린 연료이다. 본 실험에 적용한 연료 구성 방식은 브라질 현지에서 사용하는 방식이다.

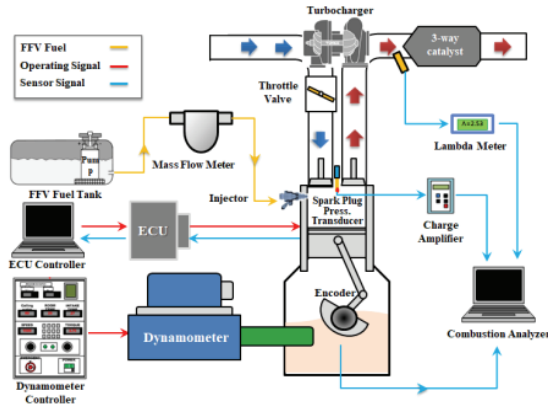


Fig. 3 Schematic diagram of 1.0 L T-GDI FFV engine test bench

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 장치들의 개략도를 나타낸 것이다. AVL 사의 EC 엔진 동력계와 Bobcat Control Unit을 사용하여 엔진 회전 속도 및 부하를 제어하였고, Oval 사의 코리올리식 연료 유량계를 설치하여 BSFC (Brake Specific Fuel Consumption)를 측정하였다.

엔진 파라미터 제어에는 ETAS사의 INCA를 사용하였으며, 엔진 노크를 확인하면서 실험을 진행하였다. 부하는 INCA를 통하여 측정된 공기량을 바탕으로 제어하였고 ETAS 사의 LA04 람다미터를 통해 공기과잉률을 실시간으로 측정하였다. 모든 실험 조건의 냉각수 온도를 90 ± 2 °C로 유지하며 진행하였으며, Kistler 사의 Spark plug 형 압력 센서를 사용하여 실린더 내부압력을 측정하였다. 측정된 압력 데이터를 이용하여 ROHR(Rate of Heat Release), MFB(Mass Fraction Burned)를 계산하였고, 사이클 변동계수(COVimep)를 모든 조건에서 1.5 % 이내로 안정적인 연소 상태를 유지하며 실험을 진행하였다.

T-GDI 엔진의 점화시기를 변경하게 되면 배기가스 압력과 배기가스 온도도 변화한다. 터빈을 회전시키는 에너지가 달라지며 과급기의 과급압이 변하게 된다. 따라서 과급압의 변화는 흡입공기량에 영향을 주기 때문에 모든 실험 조건을 흡입공기량 기준으로 설정하여 실험을 진행하였다. INCA를 통해 공기량(Amount of air)을 모니터링하여, 동일한 흡입공기량을 공급하였을 때 조건으로 성능을 비교하였다.

3. 엔진실험결과

3.1 1.0 L T-GDI FFV 엔진 점화시기 로직

Fig. 4는 현재 대상 엔진에 적용된 제어 로직 그래프이

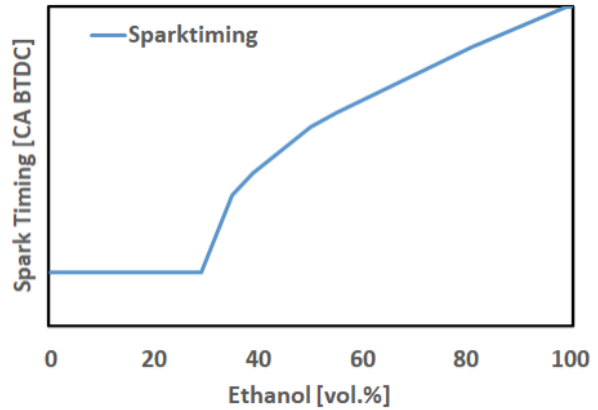


Fig. 4 Stock spark timing of 1.0 L T-GDI FFV engine

다. 이 로직은 현재 브라질 시장에서 시판되는 차량에 적용되어 있으며, E30~E100까지의 점화시기가 에탄올 함량이 증가할수록 비선형적으로 진각되는 형태로 되어 있다. 브라질 정부는 가솔린에 에탄올 비율을 27 % 이상 혼합하도록 규정하고 있기 때문에 브라질에서는 가솔린-에탄올 혼합연료 및 에탄올 100 % 연료만 사용되고 있다. 따라서, 브라질 시장까지 고려한 점화시기 제어로직으로 판단된다.

Fig. 4의 제어 로직은 지난 연구에서 분석하였던 자연흡기 엔진의 선형보간법 로직과 확실히 다르며, 지난 연구를 통해 엔진의 효율을 높이려면 점화시기를 비선형적으로 진각시켜야 한다는 결론이⁸⁾ 반영된 것으로 판단된다. 이 제어 로직은 옥탄가 RON92를 사용하는 지역 및 E27(RON92)~E100 연료를 사용하는 브라질 시장을 모두 대응하기 위해 설정된 방법으로 판단된다. 최근 바이오 에탄올에 대한 관심이 점차 높아지고 있으며, 북미와 유럽에서의 바이오 에탄올 사용량이 점점 증가하고 있다. 따라서 전 세계적으로 적용할 수 있는 FFV 엔진용 점화시기 제어 로직 개발로 확대하는 것이 필요하다고 판단하였다. 따라서 이번 연구에서는 E0, E30, E50, E100 연료의 점화시기 제어를 통하여 엔진의 성능 및 효율이 어느 정도 향상되는지 분석해 보았다.

3.2 T-GDI FFV 엔진 연료별 점화시기 진각

Fig. 5와 6에 2,000 rpm, 공기량 60 % 조건의 각 연료별 실린더 내부압력 및 열발생률과 MFB(Mass Fraction Burned) 결과를 나타내었다. 네 종류 연료에 대한 실린더 내부압력 및 열발생률 최고점의 위치가 20 °ATDC 부근인 것을 확인할 수 있었고, CA50*이 10~20 °ATDC 사이에 위치하는 것을 확인하였다. 추가적으로 점화시기를

* CA50 : crank angle at 50 % burn point

진각시켜 보았지만 출력 향상은 없는 것으로 나타났다. Stock ignition timing에서 최대 토크로 엔진이 구동되고 있으므로 이 점화시기가 MBT(Maximum Brake Torque Timing)로 판단된다.¹¹⁾ 따라서 공기량 60 % 조건에서는 추가적인 점화시기 진각이 필요하지 않다고 판단된다. 공기량 20 %, 40 % 조건도 위와 같은 경향성을 보이며, 기존의 점화시기가 MBT여서 추가적인 진각이 필요 없다고 판단하였다.

결과적으로 T-GDI 엔진의 공기량 기준 20~60 %의 저·중부하 영역에서는 점화시기가 MBT인 것으로 판단된다. T-GDI 엔진은 경우 과급기를 통하여 흡입공기가 공

급되기 때문에 자연흡기 엔진보다 더 많은 공기가 흡입되면서 연소실 내의 텀블이나 스웰 같은 유동이 강화되어 연소속도가 빠른 특성을 가지고 있다. 이 때문에, 기존 자연흡기 엔진과 다르게 저·중부하 영역에서도 MBT로 구동이 가능한 것으로 판단된다.⁸⁾

Fig. 7과 8에 2,000 rpm, 공기량 120 % 조건의 각 연료별 실린더 내부압력 및 열발생률과 MFB 결과를 나타내었다. E100 연료의 실린더 내부압력 및 열발생률 최고점 위치가 20 °ATDC 부근인 것으로 확인되었다. 그리고 E50, E30, E0 순으로 실린더 내부압력 및 열발생률 최고점 위치가 지각되는 것으로 확인되었다. MFB 결과를 보

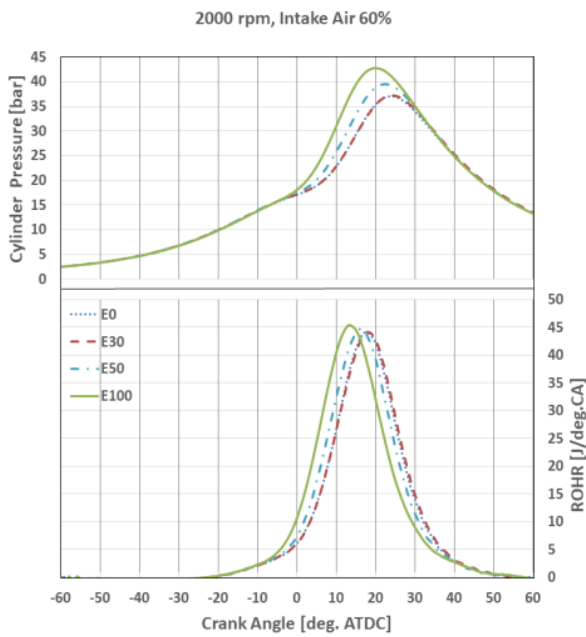


Fig. 5 Cylinder pressure and ROHR at 2,000 rpm and 60 % load

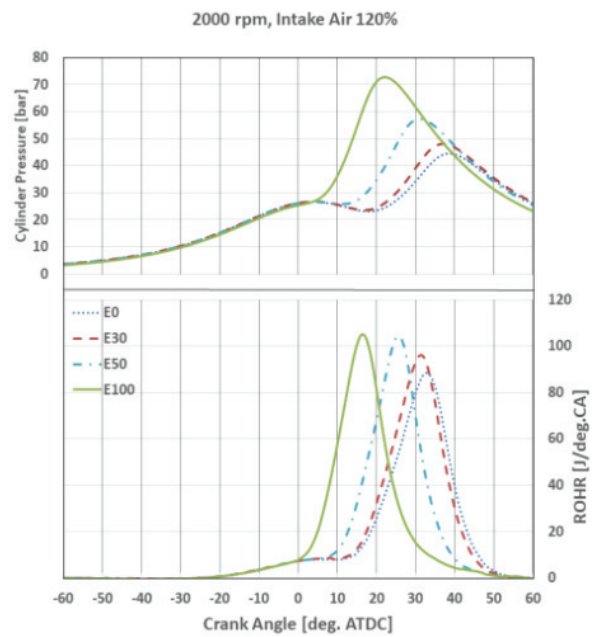


Fig. 7 Cylinder pressure and ROHR at 2,000 rpm and 120 % load

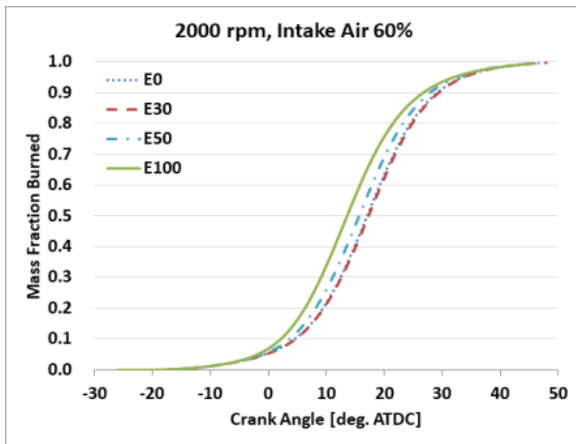


Fig. 6 Mass fraction burned at 2,000 rpm and 60 % load

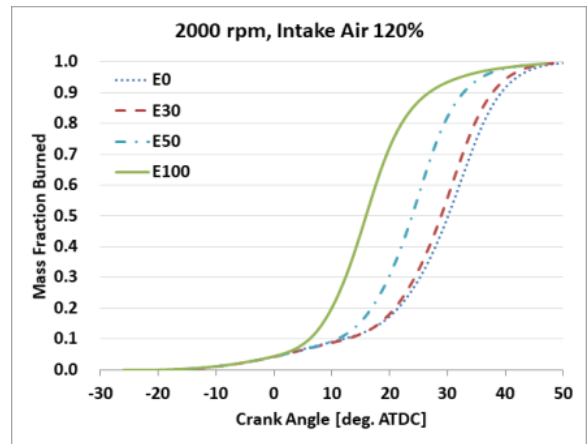


Fig. 8 Mass fraction burned at 2,000 rpm and 120 % load

있을 때 E100 연료의 CA50이 약 ATDC 15° 근방에서 발생하여, MBT로 작동하는 것을 확인하였다. E50 연료의 CA50이 약 25°ATDC 근방에서 발생하였고, E30과 E0 연료는 약 30°ATDC 근방에서 발생하였다. E30과 E50 조건은 MBT 보다 많이 지각되어 있었다. 따라서 E30과 E50 조건의 점화시기 조정을 통하여 성능 개선 가능성을 파악해 보았다.

Fig. 9와 10은 2,000 rpm, 공기량 120% 조건에서 E30과 E50 연료의 점화시기 진각에 따른 실린더 내부압력 및 열발생률과 MFB 결과를 보여준다. 그림을 참고하면, 점화시기 진각을 통해 실린더 내부압력 및 열발생률 최

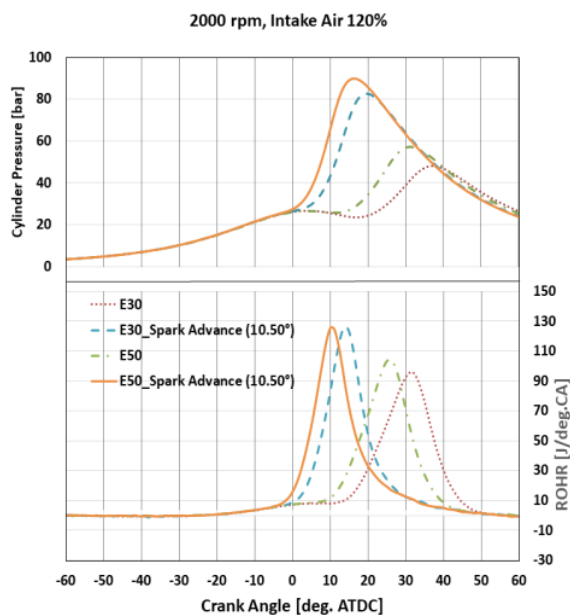


Fig. 9 Cylinder pressure and ROHR of E30 and E50 with spark advance at 2,000 rpm and 120% load

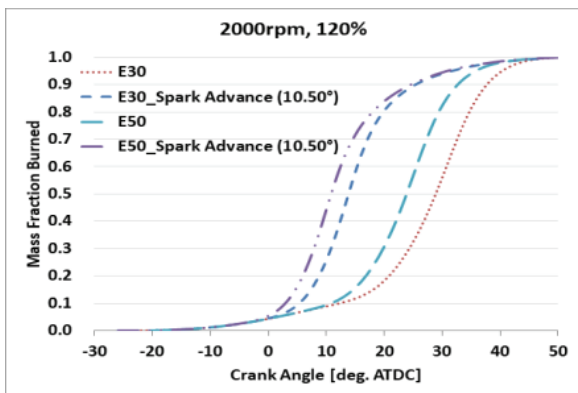


Fig. 10 Mass fraction burned of E30 and E50 with spark advance at 2,000 rpm and 120% load

고점이 상승하였으며, 열발생률 최고점 위치를 상사점 부근으로 이동시킬 수 있었다.

Fig. 10은 E30과 E50 연료의 점화시기를 최대토크가 나오는 지점까지 진각한 MFB 결과이다. E30 연료의 점화시기를 10.5°진각시키면, CA50이 ATDC 10° 근방에 위치하는 것을 확인할 수 있었다. E50 연료의 점화시기를 10.5°진각시키면, CA50이 10°ATDC 근방에 위치하는 것을 확인하였다. 점화시기 진각을 통하여 E30과 E50 조건 모두 MBT로 제어할 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 E30과 E50 조건의 점화시기를 진각시킴으로써 연소 기간이 단축되고 연소 특성이 개선되었기 때문이다. Fig. 11은 각각의 연소구간별로 MFB를 구분하여 나타내었다. 점화시기 진각을 통하여 E30과 E50 조건의 급속연소시간과 총 연소기간을 단축시킨 결과를 보여준다. 총 연소기간의 경우 E30은 11.43°, E50은 7.03° 감소하였다.

Fig. 12와 13에 2,000 rpm, 120% 공기량 조건에서 E30

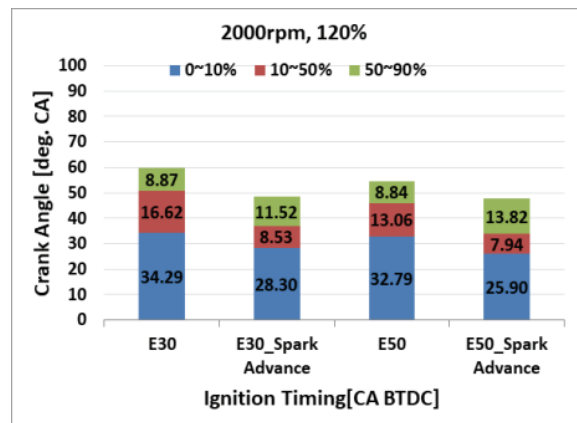


Fig. 11 Burn duration of E30 and E50 with spark advance at 2,000 rpm and 120% load

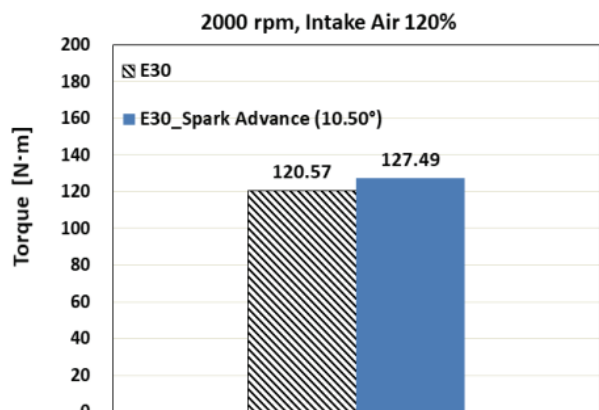


Fig. 12 Torque of E30 at 2,000 rpm and 120% load

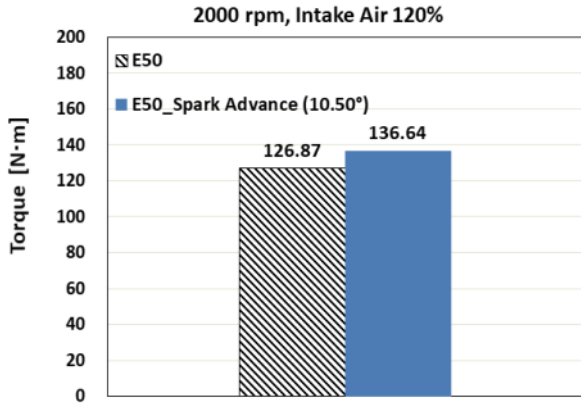


Fig. 13 Torque of E50 at 2,000 rpm and 120 % load

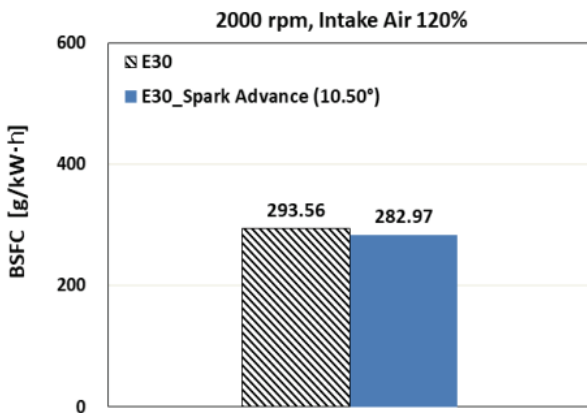


Fig. 14 BSFC of E30 at 2,000 rpm and 120 % load

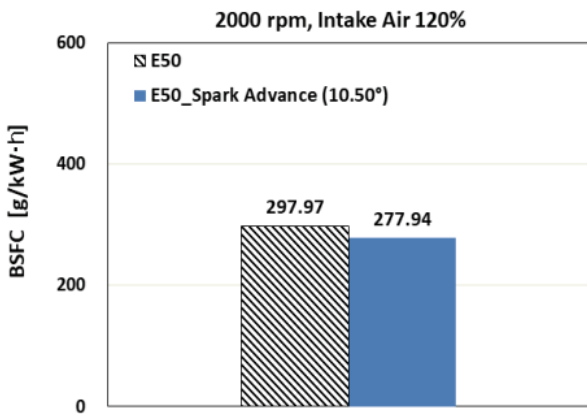


Fig. 15 BSFC of E50 at 2,000 rpm and 120 % load

과 E50 조건의 점화시기 변경에 따른 토크 특성을 나타내었다. E30과 E50 조건에서 점화시기를 진각시킨 경우, E30 조건은 토크가 약 5.3 %, E50 조건은 약 7.8 % 증가하였다. 이는 E30 및 E50 조건의 점화시기를 진각시킴으로써 연소속도가 증가하여, 연소 기간이 단축되고 연소

특성이 개선되었기 때문이다.

Fig. 14와 15에 2,000 rpm, 120 % 공기량 조건에서 E30과 E50 조건의 점화시기 변경에 따른 BSFC 변화를 나타내었다. E30과 E50 조건의 점화시기를 진각시킨 경우, E30 조건에서 BSFC를 약 3.6 %, E50 조건에서도 약 6.8 % 감소시킨 결과를 얻었다.

실험 결과를 종합해보면, E30과 E50 조건의 점화시기 진각을 통해 연소 기간을 단축시키면 토크 및 BSFC를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

공기량 80 %와 100 % 조건도 위 결과와 같은 경향성을 보여주었으며, E30과 E50 조건의 경우 점화시기 진각의 가능성이 있음을 확인하였다. 이어진 실험을 통해, 공기량 80 %와 100 % 조건에서 점화시기 진각을 통해 MBT로 연소 최적화가 가능하였으며, 연소 특성을 개선하여 출력 및 BSFC가 개선되는 결과를 얻었다.

4. 결론

본 연구를 통해 1.0 L T-GDI FFV 엔진의 성능향상을 위한 실험적 분석을 진행하였으며, 이전 연구의 1.6 L 자연흡기 엔진과의 차이를 비교해 보았다. 또한, 대상 엔진의 연소 특성 최적화를 통하여 성능 및 연료소비를 개선하였다.

- 1) 대상 엔진에 적용된 로직은 과거 1.6 L FFV 엔진에 적용된 것보다 개선된 로직이었다. 하지만 에탄올 함량 증가에 따른 옥탄가 향상 효과를 보다 효율적으로 이용하기 위해선 좀 더 효율적인 제어 로직이 필요하다고 판단된다.
- 2) 1.0 L T-GDI FFV 엔진에서 공기량 기준 20~60 %의 저중부하 영역의 점화시기는 MBT로 제어되고 있으며, 추가적인 점화시기 조정은 필요 없을 것으로 판단된다.
- 3) 공기량 120 % 조건에서 E30과 E50 연료의 대한 점화시기가 MBT 보다 많이 지각되어 있음을 확인하였다.
- 4) 공기량 120 % 조건에서 E30과 E50 조건의 점화시기를 진각시켜 E30 연료의 토크가 약 5.3 %, E50 연료의 토크가 약 7.8 % 증가하였다. 이는 점화시기 진각을 통한 연소 최적화의 효과로 판단된다.
- 5) 공기량 120 % 조건에서 E30과 E50 연료의 점화시기를 진각시켜 기존 점화시기 대비 BSFC를 E30 연료에서는 약 3.6 %, E50 연료에서는 약 6.8 % 개선시켰다.
- 6) 공기량 80 %와 100 % 조건도 위 결과와 같은 경향성을 보여주었으며, E30과 E50 연료의 경우 점화시기 진각의 가능성이 있음을 확인하였다. 공기량 80 %와 100 % 조건에서도 점화시기 진각을 통해 MBT로 연소 최적화가 가능하였으며, 연소 특성을 개선하여 출

력 및 BSFC가 개선되는 결과를 얻었다.

연구 결과, 1.0 T-GDI FFV 엔진은 1.6 L 자연흡기 FFV 엔진의 사례를 참고하여 비선형적으로 점화시기를 제어하는 로직이 적용되었다. 하지만 일부 작동 조건에서는 점화시기를 진각시키면 토크와 연료소비율이 개선된다는 사실을 확인하였고, 이를 바탕으로 글로벌 시장 대응을 위해서는 범용성 있는 점화시기 제어 로직 개발 및 적용이 필요하다는 결과를 도출하였다.

후 기

본 연구는 환경부에서 지원하는 글로벌담환경기술 개발사업 연구결과의 일부이며, 관계기관에 감사의 뜻을 전합니다.

References

- 1) Nobuo et al., Bio Fuel, Iljinsa, Seoul, 2012.
- 2) B. Hilton and B. Duddy, "The Effect of E20 Ethanol Fuel on Vehicle Emissions," Institution of Mechanical Engineers, Vol.223, No.12, pp.1577-1586, 2009.
- 3) L. Chen, R. Stone and D. Richardson, "Effect of the Valve Timing and the Coolant Temperature on Particulate Emissions from a Gasoline Direct-injection Engine Fuelled with Gasoline and with a Gasoline-ethanol Blend," Institution of Mechanical Engineers, Vol.226, No.10, pp.1419-1430, 2012.
- 4) J. Cho, W. Si, W. Jang, D. Jin C. Myung and S. Park, "Impact of Intermediate Ethanol Blends on Particulate Matter Emission from a Spark Ignition Direct Injection(SIDI) Engine," Applied Energy, Vol.160, pp.592-602. 2015.
- 5) P. Iodice, A. Senatore, G. Langella and A. Amoresano, "Effect of Ethanol-gasoline Blends on CO and HC Emissions in Last Generation SI Engines within the Cold-start Transient: an Experimental Investigation," Applied Energy, Vol.179, pp.182-190, 2016.
- 6) J. E. Anderson, T. G. Leone, M. H. Shelby, T. J. Wallington, J. J Bizub, M. Foster, M. G. Lynskey and D. Polovina, "Octane Numbers of Ethanol-gasoline Blends: Measurements and Novel Estimation Method from Molar Composition," SAE 2012-01-1274, 2012.
- 7) J. E. Anderson, U. Kramer, S. A. Mueller and T. J. Wallington, "Octane numbers of Ethanol- and Methanol-gasoline Blends Estimated from Molar Concentrations," Energy Fuels, Vol.24, No.12, pp.6576-6585, 2010.
- 8) J. Yoo, T. Lee, P. Go, Y. Cho, K. Choi and Y. Park, "An Experimental Study on Optimal Spark Timing Control for Improved Performance of Flex Fuel Vehicle Engine," Institution of Mechanical Engineers, Vol.234, No.5, pp.1294-1303, 2019.
- 9) K. Kenneth, L. Tristan, H. Clare and R. Raine, "Measurement of Vapor Pressures and Enthalpies of Vaporization of Gasoline and Ethanol Blends and Their Effects on Mixture Preparation in an SI Engine," SAE 2008-01-0317. 2008.
- 10) INCA User Manual, ETAS, Stuttgart, 2011.
- 11) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, 1988.