

연료의 안티 노크성 해석을 통한 듀얼 연료 분사 SI 엔진의 연비 향상

원 현 우*

아람코 프랑스 연구소

Efficiency Improvement of a Dual Fueling System SI Engine by Understanding of Anti-knocking Quality of Fuels

Hyun-Woo Won *

Fuel Research Center, Aramco Overseas Company B. V., 232 Av. Napoleon Bonaparte, Rueil-Malmaison 92500, France
(Received 3 August 2021 / Revised 10 August 2021 / Accepted 10 August 2021)

Abstract : It has been known that the octane number alone does not adequately describe the knocking behavior of a practical fuel in an engine. The auto-ignition or anti-knock quality of a practical fuel is defined by the octane index, where the octane numbers are the research octane number(ROK) and motor octane number(MON), and K is a constant that depends only on the pressure and temperature variations in the engine. K value is important for understanding the octane appetite of the engine in order to improve the power and acceleration of the fuel anti-knock quality. Based on the findings of this study regarding the anti-knock quality, straight-run gasoline with low RON was combined with an octane booster in order to emit the octane requirement of the SI engine. The author emphasizes that the dual fueling system engine will provide the benefits of CO₂ tank-to-wheel(TtW) and well-to-tank(WtT).

Key words : Dual fuel system engine(이중 연료 분사 엔진), Octane booster(옥탄 부스터), Octane number(옥탄가), Octane requirement(옥탄 요구치), Octane index(옥탄 인덱스), Straight-run gasoline(Straight-run 가솔린)

Subscripts

CFR : cooperative fuel research
K value: constant depending on pressure and temperature in the engine
MBT : maximum brake-torque
MON : motor octane number
NTC : negative temperature coefficient
OI : octane index
PRF : primary reference fuels
RON : research octane number
SI : spark ignition
S : sensitivity of fuel
TRF : toluene reference fuel

1. 서론

지구 온난화로 인한 온실가스 규제를 위해 이산화탄소 저감에 대한 압박은 자동차 산업에 있어 어느 때보다도 강한 실정이다. 이런 상황 속에서 기존 내연기관의 성능과 효율을 극대화하는 것은 중요하다. 자동차 내연기관에 사용되는 연료의 특성을 이해하는 것은 엔진의 성능 향상 및 연비 저감을 위해 아주 중요하다. 특히, 안티 노크성은 SI(Spark Ignition) 엔진에 있어 기관의 성능과 직접 연관이 있는 중요한 수치이다. 하지만 이를 나타내는 연료 특성치는 연료 개발 과정에서 특정 실험 엔진을 통해, 정해진 운영 조건에서 측정된 옥탄가 이외에 다른 특성치를 규정하고 있지 않다. 이 옥탄가(RON) 만으로는 다양한 엔진과 사용되는 연료들의 특성치를, 또한 엔진과 연료의 상호 작용성을 명확히 설명하기 어렵다. 이런 이유에서 많은 연구자들은 주어진 내연기관에서 특

*Corresponding author, E-mail: hyunwoo.won@aramcooverseas.com

[†]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.

정 연료들이 사용될 때 일어나는 현상을 표현할 수 있는 특성치에 대한 연구를 오랜 기간 진행해 왔다.¹⁻¹⁰⁾ 특히, Kalghatgi^{1,7,9)}는 연료의 측정값인 RON(Research octane number)와 MON(Motor octane number)의 상호 관계를 이용한 S(Sensitivity)값과 엔진의 운영 조건을 나타내는 K 값(K value - constant depending on engine condition)을 통하여 주어진 엔진에 사용된 연료의 안티 노크성을 설명하였다.¹⁾ 이것이 옥탄 인덱스(Octane index)이다. 이 수치는 엔진과 연료의 특성치를 함께 포함한다는 점에서 기존의 옥탄가보다 연료의 엔진과의 상호작용 및 특성을 보다 명확하게 나타낼 지표라 하겠다.

본 논문에서는 1.6리터 4기통 SI 엔진(압축비 10.6:1)을 기본으로 이용하여 엔진에서 요구되는 옥탄 인덱스를 TRF 실험을 통해 측정하였으며 이를 바탕으로 듀얼 연료 분사 시스템을 통해 요구되는 옥탄 인덱스를 충족시키는 연료를 엔진에 분사시킴으로써 엔진의 효율을 최적화하는 실험을 진행하였다.

2. 연료의 안티 노크성(옥탄 인덱스)

SI 엔진에서 연료의 높은 안티 노크성은 MBT(Maximum brake-torque)를 결정하고 최적의 연소 시점(Combustion phasing), 즉 스파크 타이밍을 결정하는 중요한 수치이다. 일반적으로 연료의 옥탄가(RON)를 연료의 특성치로 표시함으로써 SI 엔진 연료의 안티 노크성을 나타낸다. 이런 이유로 RON은 연료의 질을 나타내는 대표적인 값으로써, 연료 유통 과정에서 연료의 특수성을 나타내는 지표로도 사용된다. 예를 들어, 많은 나라들에서 제한적이지만 연료 주유시 자동차의 특성에 따라 다른 수준의 RON 연료를 선택 주유할 수 있는 시스템을 갖추고 있다(유럽의 경우 - 91RON, 95RON 또는 98RON). 하지만 많은 연구를 통해서 확인되었듯이 높은 압축비, 다운사이징, 터보를 통한 다양한 퍼포먼스를 갖춘 최신 엔진들의 연료 안티 노크 특성을 나타내기엔 RON과 MON만으로는 충분하지 않다.

Table 1에서 볼 수 있듯이 안티 노크성을 나타내는 RON과 MON은 CFR(Cooperative Fuel Research) 기관을 통해 다음과 같은 조건에서 측정된다. RON은 MON과 비교해서 저속, 저온에서 주어진 압축비 하에 측정된다고 하겠다. 반면 MON의 경우는 보다 높은 엔진 속도와 온도에서 측정되고 스파크 타이밍 또한 압축비 변화에 따라 약간의 조절이 된다. 하지만 이 두 특성치가 모든 엔진과 엔진 운영의 환경을 설명하지는 못한다. 안티 노크성, 즉 엔진의 MBT는 두 옥탄가와 항상 정비례하지는 않음이 많은 실험을 통해서 알려진 바 있다. 이를 보완하기 위해

Table 1 CFR test conditions for RON¹¹⁾ and MON¹²⁾

	RON	MON
Engine speed [rpm]	600	900
Intake air temperature [°C]	52	38
Intake mixture temperature [°C]	-	149
Intake pressure [bar]	Atmospheric	Atmospheric
Spark timing [°BTDC]	13	19-26

몇 가지 함수를 추가함으로써 보다 정확한 안티 노크성과 옥탄가의 관계를 설명한 것이 옥탄 인덱스(OI - octane index)이고 이는 Kalghatgi에 의해 소개되었다.¹⁾

$$OI = (1 - K) \cdot RON + K \cdot MON = RON - K \cdot S \quad (1)$$

여기서,

S(Sensitivity)는 RON - MON 이며, K값은 압력과 온도에 따른 엔진 운영 조건을 나타내는 상수이다.

여기서, S값은 연료의 특성값으로써, RON과 MON의 차이로 나타내는 연료의 민감도, K값은 엔진 디자인과 운영 조건에 관련된 수치로써, 실험을 통해 엔진의 운영 조건에 따른 압력과 온도에 의해 결정되는 상수이다. 이 K값은 엔진 실험을 통해 연소실에서의 흡기의 압력과 온도에 의한 MBT를 계산함으로써 결정된다. Fig. 1은 압축비 9.2:1 SI 엔진의 압축과정에서의 온도와 압력의 변화, 즉, 압축된 혼합 기체의 온도와 압력 궤도를 보여준다. RON과 MON 실험의 경우, 흡입 기체의 온도와 압력의 궤도는 결과와 같다. 그림에서 보듯이, RON과 MON 실험의 경우는 정해진 값을 갖지만, 실제 엔진의 경우는 연소실 형태와 주어진 환경에 따라 다른 온도와 압력의 궤도를 보이게 된다. 이는 참조 논문에서도 소개했듯이,^{1,11)} 최근 엔진들의 경우, 높은 압축비와 최적화 및 가속 성능 향상 등을 위해 마이너스의 K값을 갖는 경우가 많으며(그림에서 Beyond RON 구역), 이 경우, 같은 RON 연료 중 보다 낮은 MON을 갖는 연료(높은 Sensitivity 연료)가 높은 안티 노크성을 갖게 된다는 뜻이다. 주어진 온도에서 압력 변화에 의한 열역학적 변화에 높은 S값의 연료가 낮은 민감도를 보임을 알 수 있다. 이는 Leppard¹²⁾의 연구에서 알 수 있듯이, PRF(Primary reference fuels) 연료와 Non-PRF 또는 TRF(Toluene reference fuel) 연료가 다른 S값을 갖는 것으로 보아, 저온에서의 연료 NTC(Negative temperature coefficient) 구간에 의한 화학적 특성에 의한 결과라고 하겠다. 결론적으로 연료 개발에 있어 높은 안티 노크성을 갖기 위해서는 RON 뿐만 아니라 S값을 조정하는 것이 중요하다 하겠다.

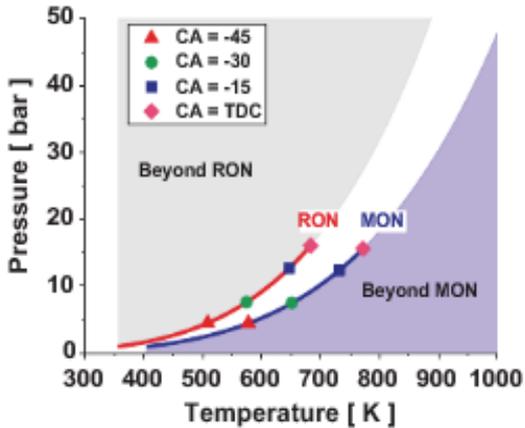


Fig. 1 Pressure-temperature trajectories for the unburned gas in the RON and MON tests at a compression ratio of 9:2:1, with the “beyond RON” and “beyond MON” regions highlighted¹³⁾

3. TRF 실험을 통한 옥탄 요구값 측정

연료의 안티 노크성 요구치는 엔진의 운영 조건 즉, 속도와 부하에 따라 변화된다. 이 수치는 대부분 PRF 실험(Iso-octane / n-heptane) 을 통해서 측정되는데,^{15,16)} Non-PRF 연료의 경우는 TRF(Toluene / n-heptane) 실험을 통해 엔진의 옥탄 요구치를 측정 할 수 있으며 본 실험에서 사용된 TPR 연료의 종류를 Table 2에 나타내었다. TRF 실험 전, 사용될 연료들은 연료의 혼합을 통해 결정하였고 실험 엔진의 K값은 E5(Reference 연료)와 TRF 실험을 통해 계산하였다(K=0.4~0.5). 각 연료들의 안티 노크성(MBT)과 옥탄 인덱스 요구치를 TRF 연료를 통해 측정하였다. 엔진 노킹은 노킹 센서와 연소실 압력 센서로부터의 노크성(Knocking intensity)과 엔진 주변에 설치한 마이크를 통해 연소 소음을 측정함으로써 노킹 여부를 판별하였다. 이를 바탕으로 각 연료들의 주어진 엔진 속도와 부하에서의 MBT를 측정하고 이를 기반으로 연료

Table 2 Test fuels for TPR test(toluene/n-heptane)

Fuel	RON	MON	Sensitivity	LHV [MJ/kg]
TRF 70	71.3	63.4	7.9	41.9
TRF 85	85	75.5	9.5	41.4
TRF 90	90.8	80.7	10.1	41.1
TRF 95	97.5	86.6	10.9	40.9
Gasoline (E5)	97.5	87.1	10.4	42.1
TRF 105	105	93.3	11.7	40.6
TRF 110	111.2	98.8	12.4	40.4

의 옥탄가를 이용하여 옥탄 인덱스를 계산함으로써 옥탄 인덱스 요구치를 측정하였다.

Fig. 2는 엔진 실험을 통해 얻은 연료의 옥탄가, 옥탄 인덱스와 MBT의 관계를 보여준다. 실험 조건은 가온 측정 즉, 냉각수와 엔진오일의 온도를 섭씨 90도로 유지하고(엔진오일 운영조건에 따라 115도까지 상승), 연료의 분사 압력은(GDI: 50-150 bar) 운영 조건에 따라 조절하였다. 연소 시점은 스파크 타이밍을 통해 최적화하였다(50 % of burnt mass fraction at 7 °CA ATDC). Fig. 3은 TRF 연료를 사용한 안티 노크성 실험을 통해 측정된 엔진의 옥탄 인덱스 요구치를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, 옥탄가 즉 RON과 MON의 경우는 엔진 운영 조건의 변화에 따라, 또는 연료의 변화에 따라 다양하게 변화되는 반면, 옥탄 인덱스의 경우는 본 기관의 MBT와 비례하는 성향을 보임으로써 엔진에 사용된 연료의 안티 노크성을 이해하는데 유용한 지표로 볼 수 있다. 여기서 측정된 K값은 주어진 엔진의 특성치로써 모든 연료 실험시에

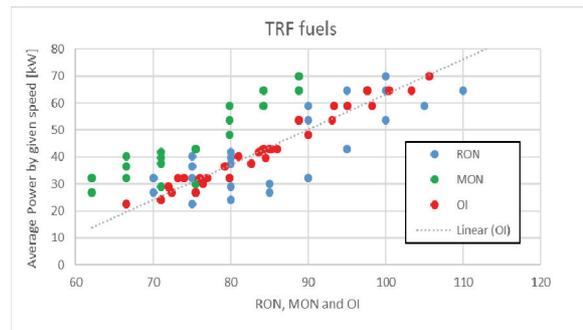


Fig. 2 RON, MON and OI of TRF fuels(1.6 L SI GDI engine)

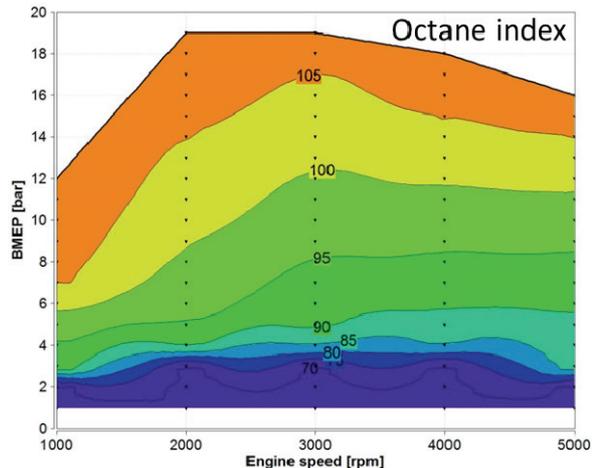


Fig. 3 Octane index requirements of the engine on TRF fuel tests(1.6 L SI GDI engine)

적용이 가능한 상수값이라 하겠다. 본 실험 결과, 저속시에는 K값과 S값으로 인해 비교적 높은 옥탄 인덱스가 요구되며, K값이 거의 0에 가까운 3,000 rpm의 경우, E5 기본 가솔린 연료 사용시 9 bar의 제동 평균 압력(BMEP)에서 MBT를 형성하였다. 저부하에서는 낮은 옥탄 연료로도 스파크 타이밍 조절없이 MBT 운영이 가능하고, 전체 구간에서 MBT(스파크 타이밍 딜레이) 없이 엔진 운행이 가능하려면 아주 높은 옥탄가 연료(TRF 105이상)가 요구된다. 고속 구간의 경우, K값의 증가로 비교적 높은 옥탄가의 연료가 저속 구간보다 많이 사용된다. 본 실험을 통해, 사용 엔진에 요구되는 옥탄 인덱스와 옥탄가를 측정함으로써 다중 분사를 통한 연료 배합의 기준점을 제공할 수 있으며 본 논문은 듀얼 연료 분사 시스템 엔진에서 최적의 연료 배합을 통한 엔진 성능과 연비 향상을 실험하였다.

4. 엔진 실험에 사용될 연료들의 선택

SI 엔진의 경우 엔진 성능 향상을 위해 보다 높은 옥탄가의 연료가 요구되지만 고옥탄 연료를 제작하기 위해서는 Straight-run 가솔린에 옥탄가를 높이는 추가적 정유 과정이 필요하고 이런 추가 정유과정에서 보다 많은 이산화탄소 배출이 요구됨을 기억해야 한다. 또한 TRF 실험을 통해 증명하였듯이, 실질적으로 엔진 운영에 있어 높은 옥탄 연료의 필요성은 고부하 영역에 국한된다. 이는 고옥탄 연료만을 사용할 시에는 중, 저부하 구간에서는 불필요하게 높은 옥탄 연료가 사용되는 것이라 하겠다. 이 이유에서 엔진에서 요구되는 안티 노크성을 정확하게 파악하고 이에 상응하는 연료를 엔진 운영 조건에 따라 적절히 사용할 수 있다면 엔진 성능 향상은 물론이고 연비 즉, 이산화탄소의 배출을 줄일 수 있고 또한 정유 과정에서의 이산화탄소 발자취(Foot-print)를 줄일 수 있는 획기적 방법이라고 볼 수 있다. 따라서, 본 논문은 정유과정에서 손쉽게 생성되는 Straight-run 가솔린(Naphtha, 70 RON)을 기본 연료로 사용함으로써 정유과정에서의 이산화탄소 저감 및 저부하에서의 옥탄가의 과소비 감소를 기대하고 듀얼 분사 엔진 기술¹⁷⁾을 통한 기본 연료에 옥탄 부스터¹⁸⁾를 혼합함으로써 엔진의 성능을 향상시키는 연구를 수행하였다. 우선적으로 옥탄 부스터 선택을 위해 현재 상용되는 옥탄 부스터들을 비교 선택하였다.

4.1 옥탄 부스터의 결정

본 논문에서는 일반적으로 사용되는 고옥탄 연료들의 특성 비교를 통해 옥탄 부스터를 결정하였다. Table 3은

Table 3 Test fuel comparisons by CFR test

Fuel	RON	MON	Sensitivity	LHV [MJ/kg]
Straight-run gasoline	71	69	2.0	43.8
Ethanol	108	90	18	26.9
Butyl alcohol	107	95	12	32.9
Reformate	111	101.5	9.5	41.2

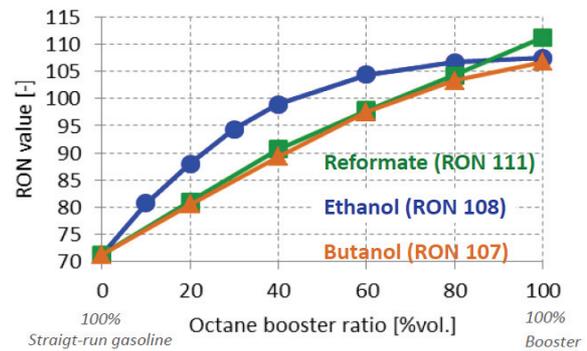


Fig. 4 Proportion of octane booster on CFR tests

본 실험에 사용된 연료 특성을 보여준다. 기본 연료와 옥탄 부스터 연료들의 실제 옥탄가는 CFR 실험 기관을 통해 측정하였고 측정된 옥탄가 결과치와 연료 특성에 관한 참조 논문들을 통해 고옥탄 연료들을 비교하였다.

Fig. 4는 기본 연료인 Straight-run 가솔린에 옥탄 부스터 연료들의 혼합을 증가에 따른 옥탄가(ROn) 증가치를 보여준다. 옥탄가는 물론 옥탄 부스터 혼합량 증가에 따라 증가되는데, 실험 결과에서 볼 수있듯이, 옥탄 증가치는 부피에 비례하는 것이 아니라 연료의 몰비(Molar ratio)에 비례함을 알 수 있다.¹⁹⁾

에탄올과 가솔린과 같은 혼합 연료의 옥탄가 증가치는 수치로도 계산이 가능한데, 다음과 같다.

$$ON_b = (1-x_a) \cdot ON_g + x_a \cdot ON_a + P_g \cdot x_a \cdot (1-x_a) \cdot (ON_a - ON_g) \quad (2)$$

여기에서,

ON_b 는 혼합물의 옥탄가, ON_g 는 가솔린 옥탄가, ON_a 는 알콜 연료 옥탄가, P_g 는 싱글 스케일 파라미터(0.46, 가솔린과 에탄올 혼합(50:50)의 실험을 통해 계산된 값), x_a 는 에탄올(알콜 연료)의 몰비이다.

결론적으로, 에탄올은 다른 연료들과 비교했을 때, 작은 양의 부피로도 높은 옥탄가 증가 효과를 보였고 에탄올의 높은 S값과 기화열은 엔진 운영 조건에 따라 높은

안티 노크성의 효과를 나타낼 수 있다. 낮은 옥탄가인 기본 연료와의 혼합에 있어 적은 양의 옥탄 부스터로 높은 안티 노크성을 보임으로써 에탄올이 본 연구에 옥탄 부스터 연료로 적합함을 증명하였다.

5. 엔진 실험 결과 및 논의

본 논문에서 사용된 엔진은 기존의 직접 분사식 가솔린 기관을 개조하여 포트 연료 분사 장치를 추가한 듀얼 분사 시스템 엔진으로써 기본 연료인 Straight-run 가솔린은 포트 분사로, 옥탄 부스터인 에탄올의 경우는 직접 연소실에 분사하는 시스템을 이용하였다. 이는 에탄올의 높은 기화발열량(Latent heat vaporization)을 통한 엔진의 안티 노크성 향상의 효과를 추가적으로 보기 위함이다.

Fig. 5는 엔진 운영 조건의 변화와 연료 혼합을 변화에 따른 안티 노크성과 연료 특성치(ROn, MON, OI)의 관계를 보인다. 엔진 실험 조건은 TRF 실험과 상이하하며, 기본연료 분사 즉, 포트 분사압은 3.5 bar이다. 이미 보았듯이, 옥탄가로는 엔진 환경과 연료 변화에 따른 안티 노크

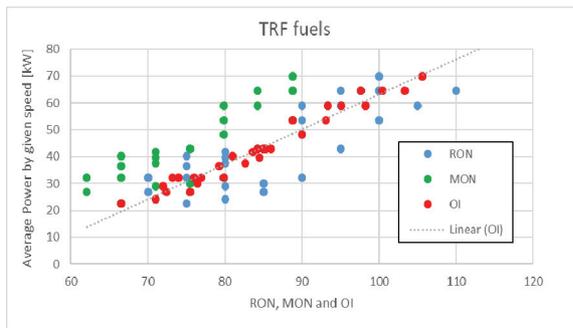


Fig. 5 RON, MON and OI of ethanol /base fuels(1.6 L dual fuel SI engine)

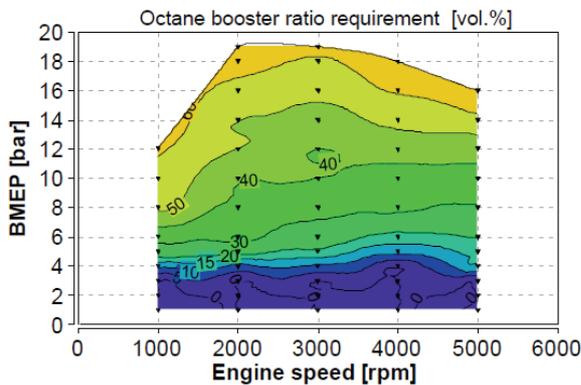


Fig. 6 Proportion of octane booster on the dual fuel SI engine

성의 특성을 표현할 수 없으며, 옥탄 인덱스가 다른 특성치보다 안티 노크성과 비례함을 보임으로써 본 엔진의 특성을 이해하는데 사용이 용이하다 하겠다. 이 안티 노크성에 관한 정보를 기반으로 기본 연료와 옥탄 부스터의 혼합율을 결정하였다. Fig. 6은 엔진 운영시에 실질적으로 사용된 옥탄 부스터(에탄올)의 추가 비율을 기본 연료 부피량과 비교하여 나타낸다. 듀얼 연료 분사 시스템 엔진의 개발을 통해 저부하에서는 낮은 옥탄 연료의 사용만으로 엔진 운영이 가능하고 중, 고부하시에는 옥탄 부스터의 증가를 통해(MBT 없이) 전구간을 효율적으로 운영할 수 있다. 연비 저감 효과는 실험 조건과 연료 생산 및 제공과 관련이 있기 때문에 정확한 숫자로 규정하는 것이 어렵지만, 엔진 실험 비교와 전과정 환경 영향적 비교를 통해 평가할 수 있다. 저부하시에는 Straight-run 가솔린이 현재 일반적으로 사용중인 가솔린 연료와 비교해 약 3.7 %의 이산화탄소 저감 효과(높은 LHV와 높은 H/C로 인한 효과)를 가짐으로써, 이로 인한 연비 저감이 기대되고 고부하에서는 MBT 증가에 따른 효율증가에 따른 연비 저감을 추가적으로 기대할 수 있다. 뿐만 아니라, 연료 생산에 있어 추가적인 이산화탄소의 저감 효과를 볼 수 있다(ca. 5 % of CO₂ benefit WtT and ca. 4 % of CO₂ benefit in TtW on WLTC). 본 논문을 통해 개발한 엔진의 경우, 기존 엔진에 비해 9 %까지의 이산화탄소 저감이 가능한데, 이산화탄소 저감은 엔진으로부터의 이산화탄소 저감을 비교(TtW, 71.2 gCO₂eq/MJ from 74 gCO₂eq/MJ)와 연료 생산에서의 에너지 사용 비교를 통한 값이다. 특히, 연료생산과정에서 발생하는 총에너지는 LCA(Life Cycle Assessment)를 통한 연료 생산과정에서의 필요 에너지²⁰⁾와 재생 에너지(에탄올) 사용을 통한 이산화탄소 저감 효과를 반영한 결과값이다.

6. 결론

본 논문은 SI 엔진에서의 성능 향상 및 연비 저감을 위해 중요한 특성치인 안티 노크성을 보다 명확히 해석함으로써 이를 듀얼 연료 분사 시스템 엔진을 통해 증명하였다.

- 1) SI 엔진에서의 안티 노크성을 규정하기 위해 옥탄가보다 옥탄 인덱스가 유용함을 증명하였다.
- 2) TRF 실험을 통해 사용 엔진과 연료에 요구되는 안티 노크성을 옥탄 인덱스로 규정하였다.
- 3) 연료 특성과 성분을 비교함으로써 듀얼 연료 분사 시스템 엔진의 사용 연료를 결정하였으며 Straight-run 가솔린과 에탄올을 본 논문에 사용하였다.
- 4) 엔진 실험을 통해 옥탄 인덱스가 사용 엔진에 연료의

안티 노크성을 나타냄을 증명하였고 이를 토대로 연료의 혼합율과 엔진 운영 방식을 규정하였다.

- 5) 옥탄 인덱스를 이용한 듀얼 분사 시스템 엔진을 개발함으로써, 엔진 성능 향상과 연비 저감 효과를 위해 안티 노크성의 이해가 중요함을 증명하였다.

References

- 1) G. T. Kalghatgi, "Auto-ignition Quality of Practical Fuels and Implications for Fuel Requirements of Future SI and HCCI Engines," SAE 2005-01-0239, 2005.
- 2) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, Ch.9, McGraw Hill Book Co., 1988
- 3) J. C. Ingamells and E. R. Jones, "Developing Road Octane Correlations from Octane Requirement Surveys," SAE 810492, 1981.
- 4) A. G. Bell, "The Relationship between Octane Quality and Octane Requirement," SAE 750935, 1975.
- 5) F. Millo, C. V. Ferraro and M. Rocco, "The Effect of Unleaded Gasoline Formulation on Antiknock Performance," SAE 941862, 1994 Also in SAE SP-1054.
- 6) V. Arrigoni and G. M. Cornetti, "High Speed Knock in S.I. Engines," SAE 741056, 1974.
- 7) G. T. Kalghatgi, "Fuel Anti-Knock Quality – Part I. Engine Studies," SAE Transactions, 1993-2004, 2001.
- 8) D. Bradley, C. Morley and H. L. Walmsley, "Relevance of Research and Motor Octane Numbers to the Prediction of Engine Auto-ignition," SAE 2004-01-1970, 2004.
- 9) G. T. Kalghatgi, M. Golombok and P. Snowdon, "Fuel Effects on Knock, Heat Release and 'CARS' Temperatures in a Spark Ignition Engine," Combustion Science and Technology, Vol.110, No.1, 209-228, 1995.
- 10) D. Bradley, G. T. Kalghatgi and M. Golombok, "Fuel Blend and Mixture Strength Effects on Autoignition Heat Release Rates and Knock Intensity in S.I. Engines," SAE 962105, 1996.
- 11) ASTM International, Standard Test Method for Research Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel, ASTM D 2699-11, Rev. 2011.
- 12) ASTM International, Standard Test Method for Motor Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel, ASTM D 2700-11, Rev. 2011.
- 13) J. P. Szybist and D. A. Splitter, "Pressure and Temperature Effects on Fuels with Varying Octane Sensitivity at High Load in SI Engines," Combust Flame 2017 March, Vol.177, pp.49-66, 2017.
- 14) W. R. Leppard, "The Autoignition Chemistries of Primary Reference Fuels, Olefin/paraffin Binary Mixtures, and Non-linear Octane Blending," SAE 922325, 1992.
- 15) J. Lee and H. H. Song, "Experimental and Computational Study on Recompression Reaction of Pilot-injected Fuel during Negative Valve Overlap in a Gasoline-fueled Homogeneous Charge Compression Ignition Engine," Int. J. Automotive Technology, Vol.15, No.7, pp.1071-1082, 2014.
- 16) W. Park, C. Park and G. Cho, "Performance of Naphtha in Compression Ignition Modes using Multicomponent Surrogate Fuel Model," Int. J. Automotive Technology, Vol.21, No.4, pp.843-853, 2020.
- 17) M. Kim, J. Lim, K. Kang and S. Lee "A Study on Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Filled with Premixed Gasoline/Pilot Diesel," Transactions of KSAE, Vol.25, No.3, pp.326-335, 2017.
- 18) H. Song, K. Kim, T. Lim and H. Kim "The Experimental Study of the Effect of Oxygenates on Exhaust Emissions and Fuel Economy of MPI and GDi Vehicles," Transactions of KSAE, Vol.25, No.5, pp.632-640, 2017.
- 19) 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.
- 20) M. Wang, H. Lee and J. Molburg, "Allocation of Energy Use in Petroleum Refineries to Petroleum Products," The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol.9, No.1, pp.34-44, 2004.