

다양한 연료온도 조건에 있어서의 기존 가솔린과 F-T합성 가솔린의 분사율 특성 비교 연구

손지현* · 배규한* · 문석수*[†]

A Comparative Study on the Injection Rate Characteristics of Conventional and F-T Synthetic Gasoline Under Various Fuel Temperatures

Jihyun Son, Gyuhan Bae, and Seoksu Moon

Key Words: e-Fuel(재생 합성연료), Fischer-Tropsch Synthetic Gasoline(피셔-트롭시 합성 가솔린), Injection rate(분사율), Fuel temperature(연료 온도)

Abstract

Amidst the drive towards carbon neutrality, interest in renewable synthetic e-fuels is rising rapidly. These fuels, generated through the synthesis of atmospheric carbon and green hydrogen, offer a sustainable solution, showing advantages like high energy density and compatibility with existing infrastructure. The physical properties of e-fuels can be different from those of conventional gasoline based on manufacturing methods, which requires investigations into how the physical properties of e-fuels affect the fuel injection characteristics. This study performs a comparative analysis between conventional and Fischer-Tropsch (F-T) synthetic gasoline (e-gasoline) across various fuel temperatures, including the cold start condition. The fuel properties of F-T synthetic and conventional gasoline are analyzed using a gas chromatography-mass spectrometry technique and the injection rates are measured using a Bosch-tube injection rate meter. The F-T synthetic gasoline exhibited higher density and kinematic viscosity, but lower vapor pressure compared to the conventional gasoline. Both fuels showed an increase in injection rate as the fuel temperature decreased. The F-T synthetic gasoline showed higher injection rates compared to conventional gasoline regardless of the fuel temperature.

기호설명

P : 압력, bar
 c : 음속, m/s
 ρ : 밀도, kg/m³
 u : 속도, m/s
 \dot{m} : 분사율, kg/s

A : 단면적, m²
 v : 동점도, mm²/s

1. 서론

전세계적으로 탄소중립이 대두되고 있는 가운데, 그린수소와 대기중에서 포집한 이산화탄소를 합성하여 만든 재생 합성연료(e-fuel: electro-fuel)에 대한 관심이 집중되고 있다. 여기서, 그린수소는 신재생 에너지로부터 생산한 전기로 물을 전기분해한 청정수소를 말한다. 그린수소와 이산화탄소를 합성한 가스를 이용하여 기존에 사용하던 연료와 유사한 연료로 합성할 수 있다⁽¹⁾. 이렇

(Received: 30 Aug 2023, Received in revised form: 14 Sep 2023, Accepted: 15 Sep 2023)

*인하대학교 기계공학과

[†]책임저자, 문석수, 인하대학교 기계공학과

E-mail : ss.moon@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7378 FAX : (032)868-1716

계 합성한 연료는 사용 과정에서 탄소가 배출되지만 생산 과정에서 탄소를 소비하기 때문에 순탄소 배출량은 0인 탄소중립연료라고 간주된다. 이에 e-fuel은 탄소 중립을 통한 기후 변화에 대응하는데 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있으며, 추가로 기존 액체 연료와 물성이 유사하여 높은 에너지 밀도를 갖고 기존 인프라를 활용할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다.

재생합성 가솔린(e-가솔린)을 합성하는 방법은 Fischer-Tropsch(F-T)기법과 MtG(Methanol to Gasoline) 기법으로 분류할 수 있다⁽¹⁾. 먼저, F-T 기법은 그린수소와 포집된 이산화탄소를 직접 반응(직접법)시키거나, 이산화탄소를 일산화탄소로 변환시킨 후 수소와 반응(간접법)시켜 원유를 생산한다. 그 후 현재 가솔린을 증류하는 방법과 동일한 방법을 적용하여 가솔린을 생산한다. MtG 합성은 이산화탄소와 수소를 합성하여 원유 대신 메탄올을 생성하며, 이를 MtG 반응을 통해 가솔린으로 변환한다. 위 두가지 합성 방법에는 각각의 장단점이 존재한다. F-T합성의 경우, 증류 과정의 변화를 통해 가솔린뿐만 아니라 e-디젤 등의 다양한 탄화수소 생성할 수 있다는 장점이 있는 반면, 복잡한 기술을 필요로 하고 비용적인 측면에서 단점이 있다. 한편, MtG 합성은 F-T 합성에 비해 저렴하고 용이한 기술이지만, 가솔린만 생성가능 하다는 단점이 있다.

다양한 방법에 의해 생산되는 e-가솔린을 기존 가솔린 엔진에 적용하기 위해서는, e-가솔린의 물성이 기존 인젝터의 분사율 특성에 미치는 영향에 대한 선행적인 연구가 필요하나, 아직 이에 대한 연구가 미미하다. 또한, 이러한 연구를 수행함에 있어 추가로 고려해야 할 주요 변수는 연료 온도이다. 향후 발효될 Euro7 등의 환경규제에 있어 영하온도의 냉간 시동조건이 포함되는 바⁽²⁾, 연료 온도의 변화가 연료 분사특성에 미치는 영향을 파악하는 것은 중요하다. 기존의 디젤에 있어 영하조건을 포함한 연료 온도의 영향을 조사한 연구 예는 있으나⁽³⁾, 가솔린에 대해서는 이러한 연구 예를 아직 찾아볼 수 없다. 따라서, 기존 가솔린과 e-가솔린의 분사율 특성을 영하조건을 포함한 연료온도 조건에 대하여 비교하는 것은, 지구온난화 및 환경규제에 대응하는 e-가솔린의 도입기술 개발에 있어 중요한 연구주제라 할 수 있다.

이러한 배경 아래, 본 연구에서는 기존 가솔린과 F-T 합성 가솔린의 분사율 특성을 상온과 영하 조건을 포함하는 다양한 연료 온도에 있어 비교 분석하는 연구를 수행하였다. 연료의 물성은 GC(Gas Chromatography)와

MS(Mass Spectrometry)을 같이 수행하는 GC-MS기법을, 분사율은 Bosch-tube 분사율계를 이용하여 측정하였다. F-T합성 e-가솔린의 합성재료인 수소 및 일산화탄소는 석탄가스화를 통해 얻었다. 합성 재료를 얻는 과정에만 차이가 있고, 이후의 과정은 e-가솔린의 생산 공정과 동일한 바, 본 연구에 활용한 모사 e-가솔린은 실제 e-가솔린의 특성을 그대로 반영할 것이라 판단하였다.

2. 실험 방법 및 조건

2.1 분사율 실험 장치

Figure 1은 Bosch-tube 분사율계 실험 장치의 개략도를 나타낸다. Bosch-tube기법은 연료로 가득 찬 관 내에 연료를 분사하여 압력의 변화를 측정하고, 이를 압력과 이론에 적용하여 분사율을 얻어내는 기법이다⁽⁴⁾. Fig. 1에서 볼 수 있듯, 실험장치는 크게 분사율 측정장치와 연료 분사장치로 구성된다.

분사율 측정장치에는 상용 5-hole GDI 인젝터(Hyundai KEFICO Co.), 냉각기(RW-1025G Lab. Companion Co.), 압저항형 압력센서(4007D, Kistler Co.), 배압 레귤레이터(088S-050A-10, Drastar Co.), 니들 밸브(SUNVIS-4T-S6, Swagelok Co.), 압력계(Drastar Co.)로 나누어진다. 실험 과정은 다음과 같다. 인젝터로 연료를 분사하게 되면 압력센서를 통해 관 내의 압력 변화를 측정하고 이를 오실로스코프(TBS2104B, Tektronix Co.)로 압력 변화 데이터를 추출하게 된다. 관 내의 압력은 배압 레귤레이터를 통해 조절하고, 밸브를 통한 반사파의 측정을 통해 음속을 계산해낼 수 있다.

또한, 연료 온도를 조절할 수 있게 냉각기와 어댑터를 추가적으로 설치하여 실험 장치를 구성하였고, 어댑터 내부 공간에 냉각수를 흘려주어 인젝터와 접촉할 수 있게 설치하여 냉각수의 온도 조절을 통해 인젝터 및 분사하는 연료의 온도를 조정하였다. 압력 센서를 통해 얻은 압력값(P)을 이용하여 관(Bosch-tube)내의 연료 유속

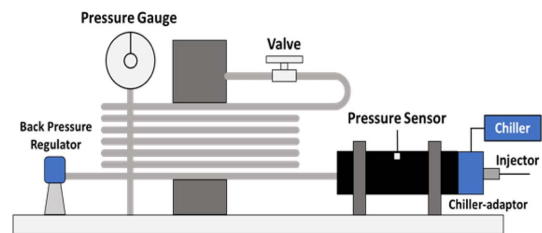


Fig. 1 Schematic of Bosch-tube injection rate meter

Table 1. Experimental conditions

Fuel type	Conventional Gasoline (CG), Synthetic Gasoline (SG)
Injection pressure (P_{inj})	35 MPa
Back pressure (P_{amb})	0.8 MPa
Injection time (T_{inj})	1.0 ms
Fuel temperature (T_{fuel})	-20, 5, 20°C

(u_{tube})을 식 (1)을 통해 구할 수 있다.

$$P = c \cdot \rho \cdot u_{tube} \quad (1)$$

여기서 c 는 연료 음속, ρ 는 연료 밀도를 의미한다. 식 (1)에서 계산해낸 연료 유속(u_{tube})을 이용하여 질량분사율(\dot{m})을 식 (2)를 통해 계산할 수 있다.

$$\dot{m} = \rho \cdot A_{tube} \cdot u_{tube} = \frac{A_{tube} \cdot P}{c} \quad (2)$$

여기서, A_{tube} 는 관의 단면적을 의미한다.

압력센서를 통해 분사과정 중의 압력변화를 측정하고 이를 식 (1)과 (2)에 적용하여 과도적 분사율 파형을 도출하였다.

본 실험에서는 Fig 1에서와 같이 냉각 어댑터를 장착하여 인젝터 내부 연료 온도를 낮춰주기 때문에 연속적으로 여러 번의 분사로 인한 연료 온도 변화를 최소화하기 위해 단일 분사를 10초의 간격으로 두어 5회 실시하고 이를 평균한 데이터를 사용하였다. 5회 분사 간 편차가 최대 0.03으로 매우 적은 수치임을 확인하였기 때문에 해당 분사 횟수에도 신뢰 가능한 데이터를 확보하였다고 판단하였다. 또한, 식 (1)에서의 음속은 센서로부터 밸브까지의 거리와 반사파가 되돌아오는 시간을 통해 계산해낼 수 있다. 기존 가솔린(CG)과 F-T합성 가솔린(SG)의 음속은 각각 1213.8 m/s, 1209.1 m/s로 측정되었다.

2.2 실험 조건

Table 1은 본 연구에서 적용한 실험 조건을 나타낸다. 연료 인젝터는 상용 5 hole 가솔린직접분사(GDI) 인젝터를 사용하였으며, 시험연료로서 기존 가솔린과 F-T합성 가솔린을 사용하였다. 분사 압력은 실제 차량의 운전 조건을 참고하여 35 MPa, Bosch-tube 내부 배압은 0.8 MPa로 설정하였다. 분사기간 역시 차량의 단일분사 운전 조건을 고려하여 1.0 ms로 설정하였고, 연료 온도는 냉간

및 상온 조건을 고려한 -20, 5, 20°C로 설정하였다. 분사 기간의 경우, 통전 기간(Energizing duration)을 의미하고, 본 연구에서 수행하고자 하는 연료 온도 및 종류에 따른 분사율의 과도 구간 및 정상 구간을 비교분석하기에 충분한 분사 기간임을 확인하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 기본 물성 비교 분석

3.1.1 연료 성분내 탄화수소 비율

Figure 2는 실험에 사용된 기존 가솔린(CG)과 F-T합성 가솔린(SG)의 탄화수소 비율을 나타낸다. 앞서 언급한대로, 연료 조성은 GC-MS 기법을 이용하여 분석하였다. GC는 혼합물을 분리하는 기술로, 연료 샘플을 주입하고 열을 가하여 샘플 내의 화학 물질들을 분리하는 방법이다. 이렇게 분리된 화학물질들은 각각의 특성에 따라 시간에 따른 그래프로 표시된다. 이후 MS로 화학 물질의 질량을 측정하여 그 화학 구조와 성분을 파악한다. GC-MS 분석 결과, F-T합성 가솔린에 상대적으로 탄소수가 많은 탄화수소의 비율이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 기존 가솔린(CG)보다 F-T합성 가솔린(SG)의 분자량이 크다는 것을 의미한다.

3.1.2 기본 물성 (밀도, 동점도, 증류성상)

Figure 3은 각각 온도에 따른 기존 가솔린(CG)과 F-T합성 가솔린(SG)의 밀도와 동점도(a), 증류 성상(b) 및 증기압 곡선(c)의 측정결과를 나타낸다. 밀도와 동점도의 경우, 기존 가솔린(CG)과 F-T합성 가솔린(SG) 모두 온도가 낮아질수록 밀도와 동점도가 증가하는 경향을 나타냈고, F-T합성 가솔린(SG)의 경우에 그 증가폭이 더 컸다. 동일 온도 조건에서 F-T합성 가솔린의 밀도와

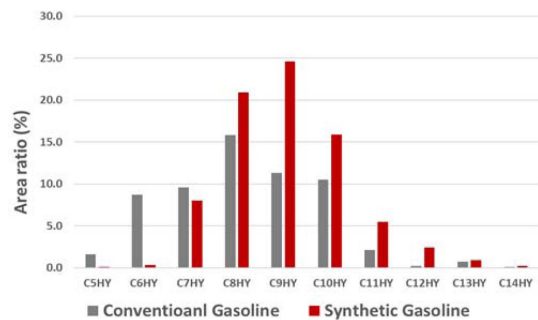


Fig. 2 Hydrocarbon ratio of CG and SG

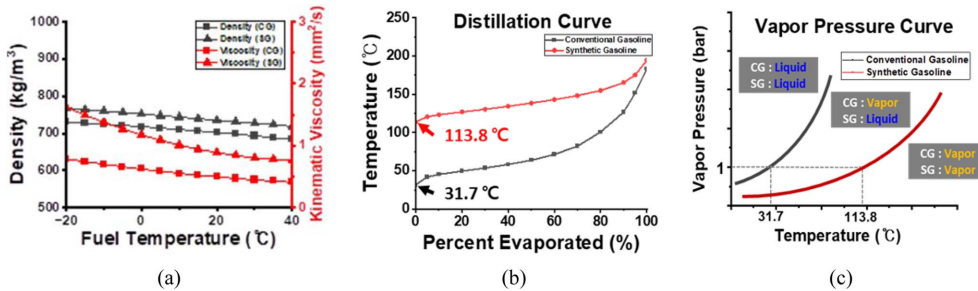


Fig. 3 Density and kinematic viscosity (a), distillation curve (b) and vapor pressure (c) of conventional gasoline (CG) and F-T synthesis gasoline (SG)

동점도는 기존 가솔린보다 크게 나타났다. 증류성상 그래프를 통해 기존 가솔린(CG)의 초류점(31.7°C)과 F-T 합성 가솔린(SG)의 초류점(113.8°C)이 다른 것을 알 수 있었다. 이를 이용하여 예측한 증기압 곡선을 보면 같은 기압 조건에서 기존 가솔린(CG)에 비해 F-T합성 가솔린(SG)의 증기압이 더 낮은 것을 알 수 있다. F-T합성 가솔린(SG)과 기존 가솔린(CG)의 물성 비교 결과에 있어, 전 온도 조건에서 F-T합성 가솔린(SG)이 기존 가솔린(CG)에 비해 높은 물성치를 가지는 이유는 Fig. 2에서 확인한 것처럼 합성 가솔린이 고탄소수의 탄화수소를 상대적으로 많이 포함하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 과도적 분사율 특성 분석

Figure 4는 분사압력 35 MPa, 분사기간 1.0 ms 조건에서 분사펄스 인가 후의 시간에 따른 인젝터 전류 파형 및 가솔린 분사율 특성을 나타낸다. 그래프의 전류 파형은 실제 자동차 운전 조건의 전류 파형과 동일하게 Boost, Peak, Hold 지점을 맞추어 설정하였다. 분사율 그래프를 통해, 분사 초기에는 파형의 변동과 함께 분사율

이 완곡하게 증가하는 구간(초록색 원 참조)이 나타남을 알 수 있으며, 이는 인젝터 내부 스프링의 상승하는 관성력에 의한 니들 오버슈팅(overshooting)과 이에 의한 니들 흔들림(wobbling)에 기인한다(5,6). 또한, 분사 종료에는 니들 바운싱(bouncing) 현상으로 인한 후적(fuel dribbling) 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다(7).

3.3 연료 온도에 따른 분사율 특성 비교

Figure 5는 연료 온도에 따른 기존 가솔린(CG)의 분사율 파형 변화를 나타낸다. 연료 온도에 따른 F-T합성 가솔린(SG)과 기존 가솔린(CG)의 분사율은 정도의 차이만 있을 뿐 전체적으로 동일한 경향성을 가지는 것을 확인하여 (CG)의 분사율 그래프를 통해 대표성을 나타내고자 하였다. 분사율 파형에서 초기(State 1)와 말기(State 2)에서 나타나는 과도 구간을 중점으로 분사율 특성을 비교하였다. 전체 구간은 State 1, 2의 과도 구간과 정상 구간으로 구분할 수 있고, 초기(State 1)은 분사율이 증가하기 시작한 시점부터 정상 구간 전까지의 기간을 의미한다. 정상 구간은 분사율 그래프를 미분하여 변화율을 통해 정의하였다. 변화율이 변화하다가 0에 근

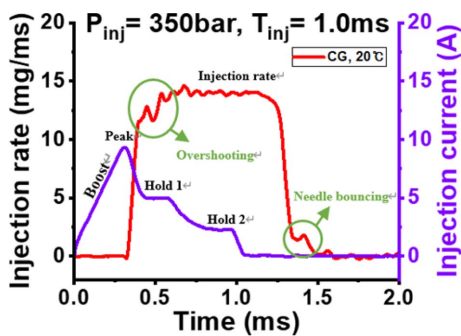


Fig. 4 Transient injection rate characteristics of CG

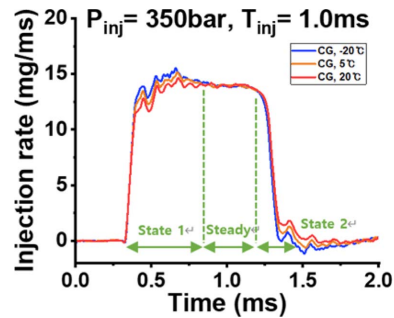


Fig. 5 Injection rate comparison of CG under various fuel temperatures

사하는 순간부터 변화율이 감소하는 순간으로 정의하였고, 말기(State 2)는 정상 구간 이후부터 니들 바운싱 후 분사율 값이 0이 되는 지점으로 설정하였다.

초기 과도 구간(State 1)을 먼저 살펴보면, 연료 온도가 낮아질수록 분사율이 증가하는 경향이 나타났다. 이에 대한 원인으로, 연료 온도가 낮아질수록 밀도가 증가하는 것과 포화 증기압이 감소하는 특성으로 인해 노즐 오리피스 내의 공동(cavitation) 현상이 억제되어 유효 단면적이 증가하는 것을 들 수 있다. 분사 말기 과도 구간(State 2)의 경우, 초기와는 반대로 연료 온도가 낮아질수록 분사율이 작아지는 경향이 나타났다. 분사 종료 시점에는 GDI 인젝터 내부 스프링의 탄성력과 니들 자체 움직임의 관성력으로 인해 니들 바운싱 현상이 발생한다. 하지만, 연료 온도가 낮아짐에 따라 연료의 동점도가 증가하기 때문에 이러한 니들 바운싱이 억제되며, 이로 인해 분사율이 작아지는 경향을 나타낸 것으로 보인다⁽⁸⁾.

이와는 다르게 초기와 말기 사이의 정상 구간에서는 연료 온도에 관계없이 분사율이 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다. 과도 구간에서 공동현상은 불안정한 니들 거동으로 인해 극대화되고 정상상태에서 억제됨에 따라 연료 온도에 따른 공동현상 및 유효면적 간 차이가 줄어들 수 있다^(5,9). 또한, 밀도는 연료 온도 감소에 따라 약 10% 증가하는 것을 확인하였다. 다만, 동점도는 연료 온도 감소에 따라 50% 이상 증가하고, 정상상태에서의 유속이 감소하여 결과적으로 연료 온도에 따른 분사율은 일정하게 나타날 수 있을 것이라 판단된다.

Figures 6는 Fig. 5의 과도 구간(State 1, State 2) 및 전체 분사율 그래프를 적분하여 얻어진 분사량을 비교한 그래프이다. 이 그래프의 경우, Fig. 1의 Bosch-tube 장치의 검증을 위하여 직접 중량법을 통해 신뢰성을 확보하였다. 중량법 실험은 2분간 5 Hz로 분사하여 총 600

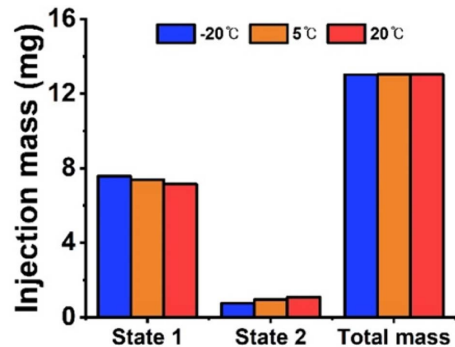


Fig. 6 Injection mass of CG under various fuel temperatures

회의 분사량을 쟀 뒤 1회 평균 분사량을 측정하고, 이를 3회 반복 및 평균하여 나타냈다. Fig. 6의 분사율 적분 값은 8 bar의 배압 조건에서 측정된 결과이므로 중량법과 비교해 다소 낮은 분사량을 나타냈다. 하지만, 3개의 분사기간 조건에 대해서 모두 편차율이 5% 이내로 모두 신뢰가능한 수준으로 판단된다.

이에 Fig. 6를 살펴보면, 분사율 그래프와 유사하게 초기 구간(State 1)에는 연료 온도가 낮아질수록 분사량이 증가하지만, 말기 구간(State 2)에서는 연료 온도가 낮아질수록 분사량이 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한, 두 효과가 서로 상쇄되어 전체 분사량(total mass)은 연료온도에 상관없이 거의 동일한 결과가 나타났다.

3.4 다양한 연료온도 조건에서의 기존 가솔린과 F-T 합성 가솔린의 분사율 특성 비교

Figure 7은 연료 온도에 따른 기존 가솔린과 F-T 합성 가솔린(SG)의 분사율 파형을 비교하여 나타낸다. 분사율 측정 결과, F-T합성 가솔린(SG)의 분사율이 기존 가솔린(CG)보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 노즐을 통해 분사되는 연료의 유량식 ($\dot{m} = \rho \cdot A_{eff} \cdot u_{inj}$)을

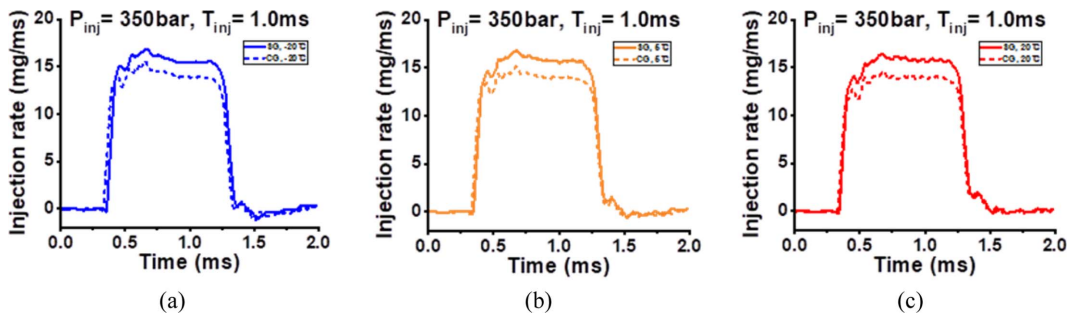


Fig. 7 Injection rate comparison of CG and SG under various fuel temperatures

통해 원인을 분석해볼 수 있다. 여기서, ρ 는 연료 밀도, A_{eff} 는 연료가 실제로 노즐 출구를 통해 지나가는 유효 단면적, u_{inj} 는 분사되는 연료의 속도를 의미한다. Fig. 3에 제시한 바와 같이 F-T합성 가솔린(SG)의 밀도(ρ)는 기존 가솔린(CG)보다 높다. 한편, F-T합성 가솔린(SG)의 포화 증기압은 기존 가솔린(CG)보다 낮으며, 이에 따른 공동현상의 억제로 인해 F-T합성 가솔린(SG)의 유효 단면적(A_{eff})이 기존 가솔린(CG)보다 클 것이라 판단할 수 있다. 최근 연구에서, 고난류를 생성하는 상용 GDI 인젝터에 있어 0.5-1.20 mm²/s의 연료 동점도 범위에 있어서는, 동점도에 따른 연료분사 속도의 변화가 미미함을 밝힌 바 있다⁶⁾. 따라서, F-T합성 가솔린(SG)의 동점도가 기존 가솔린(CG)보다 크기는 하나, 연료 분사 속도 (u_{inj})에는 큰 차이가 없을 것이라 판단된다.

결과적으로, 밀도와 유효 단면적은 F-T합성 가솔린(SG)이 기존 가솔린(CG)에 비해 높으나, 연료 분사속도의 차이는 미미하므로 F-T합성 가솔린(SG)의 분사율이 기존 가솔린(CG)보다 크게 측정되었다고 판단할 수 있다.

한편, 영하 20°C 조건의 분사율 그래프(a)에서는 영상 조건(b), (c)와 비교하여 기존 가솔린(CG)과 F-T합성 가솔린(SG)의 분사 시작과 종료 시점이 확연히 차이는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 3에 제시된 바와 같이 연료 온도가 낮아질수록 F-T합성 가솔린(SG)과 기존 가솔린(CG)의 동점도 차이가 커짐으로써, 인젝터 니들의 초기 움직임이 보다 둔화되는 것에 기인한다고 판단된다.¹⁰⁾

Figure 8은 연료 온도에 따른 기존 가솔린(CG)과 F-T합성 가솔린(SG)의 전체 분사량을 계산하여 비교한 그래프이다. 분사율 파형의 경향성과 동일하게, 연료온도

조건에 상관없이 F-T합성 가솔린(SG)의 전체 분사량이 기존 가솔린(CG)보다 연료 온도별로 약 10~12% 더 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 가솔린(CG)과 F-T합성 가솔린(SG)의 기본 물성치 및 분사율 특성을 냉시동을 포함한 다양한 연료 온도 조건에 대하여 비교 분석하였다. 본 연구에서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 연료 종류에 따른 기본 물성치 비교: F-T합성 가솔린의 밀도와 동점도는 기존 가솔린보다 크게 측정되었다. 한편, 포화증기압의 경우는 F-T합성 가솔린의 경우가 낮게 나타났다.

(2) 연료 온도에 따른 분사율 비교: 니들 오버슈팅과 관련된 분사 초기구간에서는 연료 온도가 낮아질수록 분사율이 증가하였으며, 이는 밀도의 증가 및 공동현상의 억제에 기인한 것으로 판단된다. 니들 바운싱과 관련된 분사말기 구간에서는 연료 온도가 낮을수록 분사율이 감소하였으며, 이는 동점도의 증가에 따른 니들 거동의 둔화에 기인한 것으로 보인다. 분사 초기와 말기 경향성의 상쇄효과로 인해, 전체 분사량은 연료 온도와 관계없이 편차율 5% 이내로 거의 동일하게 나타났다.

(3) 연료 종류에 따른 분사율 비교: 연료온도에 상관없이 F-T합성 가솔린의 분사율은 동일 조건에서 기존 가솔린에 비해 10~12% 더 높게 나타났다. 이는 F-T합성 가솔린의 높은 밀도 및 낮은 증기압으로 인한 유효 분사면적의 증가가 주 요인으로 판단된다.

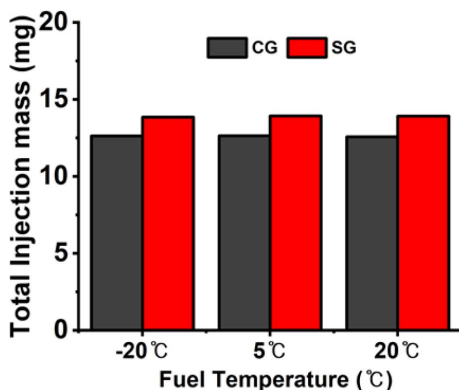


Fig. 8 Injection mass comparison of CG and SG under various fuel temperatures

후 기

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(과제번호: 20024960).

참고문헌

- (1) Jongyoon Lee, and BokJik Lee, "Survey on Research and Development of E-Fuel", Journal of The Korean Society Combustion, Vol. 27, No. 1, 2022, pp. 4~10.

- (2) "Euro 7/VII emission standards for cars, vans, buses and trucks", AECC Technical note, 2021.
- (3) Youngsoo Park, Joonsik Hwang, Choongsik Bae, Kihyun Kim, Jinwoo Lee, and Soonchan Pyo, "Effects of diesel fuel temperature on fuel flow and spray characteristics", *Fuel*, Vol. 162, 2015, pp. 4~7.
- (4) Tyler Menucci, "Development of Bosch rate of Injection measurement procedure and results", Michigan Technological University, 2018, pp. 16~20.
- (5) Weidi Huang, Seoksu Moon, Ya Gao, Zhilong Li, and Jin Wang, "Eccentric needle motion effect on near-nozzle dynamics of diesel spray", *Fuel*, Vol. 206, 2017, pp. 5~8.
- (6) Seoksu Moon, Omer Faruk Atac, Gyuhan Bae, and Jeonghwan Park, "Comprehensive investigation on ballistic injection characteristics of GDI injector: A particular focus on injection pressure and fuel effects", *Fuel*, Vol. 335, 2023, pp. 4~10.
- (7) Hui Feng Gong, Weidi Huang, Ya Gao, Jing Wang, Akira Arioka, and Yuzuru Sasaki, "End-of-injection fuel dribbling dynamics of multi-hole GDI injector", *Fuel*, Vol. 317, 2022, pp. 1~12.
- (8) Weidi Huang, Seoksu Moon, Jin Wang, Kei Murayama, Toshiyuki Arima, Yuzuru Sasaki, and Akira Arioka, "Nozzle tip wetting in gasoline direct injection injector and its link with nozzle internal flow", *International Journal of Engine Research*, Vol. 21, No. 2, 2020, pp. 5~8.
- (9) Dmitrii Mamaikin, Tobias Knorsch, Philipp Rogler, Jin Wang, and Michael Wensing, "The effect of transient needle lift on the internal flow and near-nozzle spray characteristics for modern GDI systems investigated by high-speed X-ray imaging", *International Journal of Engine Research*, Vol. 23, No. 2, 2022, pp. 9~19.
- (10) Ziman Wang, Haichun Ding, Miroslaw L. Wyszynski, Jianyi Tian, and Hongming Xu, "Experimental study on diesel fuel injection characteristics under cold start conditions with single and split injection strategies", *Fuel processing technology*, Vol. 131, 2015, pp. 3~4.