

디젤 연료 온도에 따른 분무 발달 특성

이진우*

¹울산과학기술대학교 기계공학부

Characteristics of the Spray Development with Diesel Fuel Temperatures

Jin-Woo Lee^{1*}

¹School of Mechanical Engineering, Ulsan College

요약 본 연구에서는 디젤 연료 온도에 따른 실제 분사되는 연료량, 분사율 그리고 거시적 분무 발달 과정에 대한 특성을 파악하고자 하였다. 시험 결과 동일한 분사 시작 신호 및 분사 기간 신호를 입력하였음에도 불구하고, 연료 온도가 낮아짐에 따라 실제 연료 분사량이 감소하는 경향을 보였다. 분사율 측정 결과를 통해 연료 온도가 낮은 조건에서 실제 분사 시작 시점이 지연되며, 실제 분사가 유지되는 기간이 짧아지는 것을 확인하였으며, 이를 통해 실제 분사되는 연료량 저감에 대한 근거를 찾을 수 있었다. 거시적 분무 이미지 촬영 결과를 연료 온도 별 분무 도달 거리로 표현하여 비교 하였으며, 낮은 연료 온도 조건에서 분무 미립화 성능 악화로 인해 분무 도달 거리가 길어지는 것을 확인하였다. 저온 조건에서의 연소 개선을 위해 향후 시도할 선행 평가로서 피스톤 타켓팅 평가를 수행하였으며, 이른 시기에 분사되는 파일럿 연료가 크레비스 영역으로 유입되는 것을 확인하였으며, 이를 통해 파일럿 분사 방식 적용 시 연료량 분배 및 분사 시기 선정이 매우 중요한 인자가 됨을 파악하였다.

Abstract The characteristics of the fuel quantity, injection rate and macro spray development was investigated under a range of diesel fuel temperatures. The actual injection quantity decreased despite the same signal of the injection start and injection duration as the fuel temperature decreased. The injection rate measurements confirmed that the actual injection commencement was delayed and the actual injection duration was shortened under lower fuel temperature conditions, which explains why the injection quantity decreased. Spray tip penetration with a lower fuel temperature was longer than that with a higher fuel temperature due to the deteriorated atomization. As a pre-test for the combustion experiment under low temperature conditions, piston targeting with pilot injection was accomplished, which showed that the fuel droplet from pilot injection was introduced into the crevice area. This suggests that the pilot injection quantity and timing should be chosen with careful consideration for actual applications.

Keywords : Diesel, Fuel temperature, Injection rate, Macroscopic spray image, Spray targeting

1. 서론

압축 착화 방식에 의한 디젤 엔진의 연소 특성은 연료와 공기의 혼합 정도에 주로 영향을 받는다. 따라서 연료

의 미립화 특성이 연소 과정에서 매우 중요한 역할을 한다. 일반적인 냉시동 조건에서는 연료의 미립화 특성이 악화되어 시동성이 나빠질 우려가 있다[2]. 또한 이로 인해 시동 과정에서 불완전 연소 생성물인 미연탄화수소

이 논문은 2015년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행됨

*Corresponding Author : Jin-Woo Lee(Ulsan College)

Tel: +82-52-279-3129 email: jwlee2@uc.ac.kr

Received January 15, 2016

Revised February 4, 2016

Accepted March 3, 2016

Published March 31, 2016

(Unburned hydrocarbon, UHC)와 일산화탄소 (Carbon monoxide, CO)가 다량으로 배출되며, 이는 냉시동 시 연비악화를 초래할 수 있다. 냉시동 성능 개선을 위하여 다단 분사 등의 분사전략, 글로우 플러그 성능 개선 등 다양한 방법이 고려될 수 있으나, 기존 연구는 대부분 대기통 엔진 및 CFD 계산을 통한 엔진 성능 관점 평가를 주를 이루었다[3-4]. 하지만 연소 현상에 대한 근본적인 개선을 위해서는 연료 온도에 따른 분무 특성에 대한 고찰이 선행되어야 한다[5]. 또한 현재 디젤 엔진 제어 로직 상에 연료 온도에 따른 분사량 보상이 고려되고 있으나, 실제 적용 측면에서는 아직 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 넓은 디젤 연료 온도 범위 (-30~40 °C) 내에서 연료 온도 변화가 실제 분사량, 분사율 및 거시적 분무 발달 과정에 미치는 영향에 대해 분석하고, 향후 연소 관점 개선을 위해 적용할 과일렛 분사 적용을 위한 예비 평가로서 피스톤 타겟팅 시험을 수행하여 그 타당성에 대한 고찰을 하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 연료 분사 시스템

본 실험에서는 솔레노이드 타입 인젝터를 적용하였다. 제노발티 (Zenobalti Co.)의 인젝터 드라이버 (IDU)를 사용하여 분사기 고유의 전압/전류 파형 제어를 통해 peak & hold 전류 특성을 구현하여 인젝터를 구동하였다. 연료의 분사압력은 압력제어밸브 (PCV) 드라이버를 통해 제어하였으며, 분사기간 및 분사 시기 변경을 위해 전용 인젝터 제어 장치를 사용하였다. Fig. 1은 연료 분사 시스템의 개요도를 나타낸다. 연료를 15 kW급 연료 냉동·가열기 (125L)에 저장하여 실험 조건에 따라 -30 °C부터 40 °C 까지 온도를 제어하였다. 연료가 분사 시스템 회로에서 순환하며 가압될 때 발생하는 열로 인하여 온도가 상승하는 것을 최대한 방지하고자 2차 회로를 구축하고 단열재로 표면 처리를 하였다. 또한 고압펌프, 커먼레일, 인젝터 어댑터의 연료 리턴 라인은 연료 탱크로 순환시키지 않고 별도의 저장소 (reservoir)로 순환시켜 연료의 온도를 일정하게 유지하고자 하였다. 저온 조건 시 생성되는 연료 슬러지에 의한 라인 막힘 현상을 방지하고자 연료 온도 -15 °C 부터는 연료 필터의

히터를 작동시켰다. 분사량 실험의 경우 연료 분사 시스템에서 인젝터 하단에 플라스틱 백을 설치 한 뒤 분사 압력, 분사 기간 별로 분사된 연료의 양을 실측하여 수행하였다. 분사량은 100회 분사를 통해 취득한 연료의 무게의 측정 평균값을 취하였다.

2.1.2 분사율 실험 장치

분사율은 보쉬튜브법 (Bosch tube method)을 이용하여 측정하였다. Fig.2는 분사율 실험 장치 구성을 나타낸다. 연료의 분사에 의한 튜브 내 압력 변동 해석을 위해 압전 방식의 압력 센서 (Type 6052C, Kistler)를 분사 율계에 장착하였다. 전하증폭기 (charge amplifier, Kistler 5011)을 이용하여 압력센서에서 측정된 전하 신호를 증폭하고 이를 오실로스코프 통해 PC로 취득하였다. 실험 조건 별 100회의 분사율을 측정하여 평균한 분사율 데이터를 이용, 비교분석을 수행하였다.

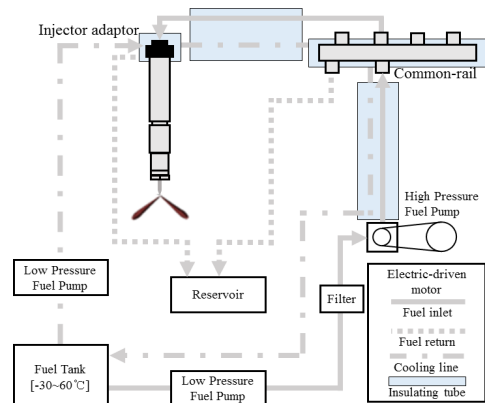


Fig. 1. The schematic of fuel injection system

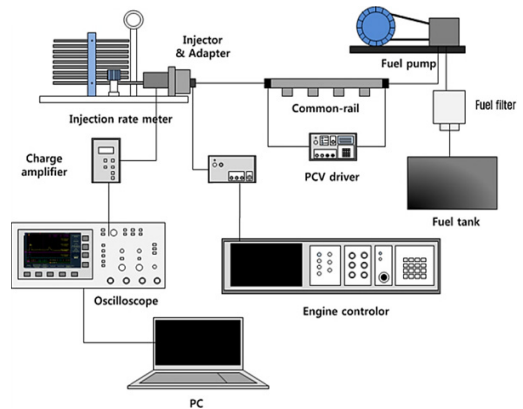


Fig. 2. The schematic of constant volume chamber

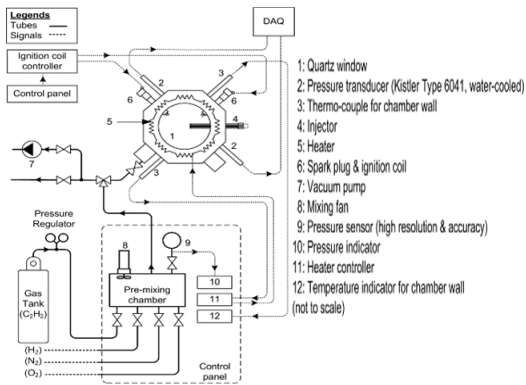


Fig. 3. Fuel density with fuel temperature change

2.1.3 거시적 분무 측정 장치

분연료의 거시적 분무 형상 이미지를 취득은 직경 100mm, 두께 50mm의 2개의 석영 (quartz) 창이 설치된 정적 챔버에서 수행되었다. 정적 챔버의 위쪽 석영 창에 HID 램프를 설치하여 비취준 빛이 연료 분무 입자에 반사되게 한 뒤 고속 카메라로 이미지를 취득하는 Mie-scattering 기법을 사용하였다. 정적챔버에서 실제 연소실 내부 압력과 온도를 모사하기 위하여 연료 분사 전 예연소를 반복 수행한 뒤 분사시기를 맞추어 실험을 진행하였다. 분무 가시화는 한 조건 당 10회 촬영하였으며 정적 챔버의 개요도는 Fig.3과 같다.

2.2 연료 물성치

본 실험에서 사용한 연료는 군용 디젤로써 주요 물성치는 Table 1과 같다. 연료의 밀도는 온도별로 연료 탱크 안에서의 높이를 측정함으로 계산되었다. 15°C일 때의 밀도 기준으로 높이를 측정하고 다른 온도에서의 연료 높이를 측정하여 비례식으로 밀도가 계산되었다. Fig.4는 온도에 따른 연료의 밀도를 나타낸다. 연료가 40°C에에서 -30°C로 하강 시, 밀도는 약 6% 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 1. The properties of fuel used in this research

Properties	Method [ASTM]	Value
Density [kg/m ³ @15 °C]	D1298	815.6
Cetan number	D4737	51.9
Kinematic viscosity [mm ² /s@30 °C]	D445	2.394
Pour point [°C]	D5950	-35
Sulfur content	D5453	7

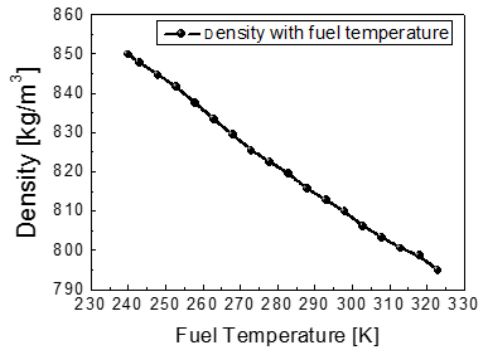


Fig. 4. Fuel density with fuel temperature change

2.3 실험 조건

연료의 온도에 따른 특성 평가를 위해 분사량, 분사율, 거시적 분무 이미지 측정 및 분무 타겟팅 시험을 진행하였다. Table 2와 같이 연료 온도, 분사압력, 분사시기, 분사량, 파일럿 분사시기에 대한 인자의 영향을 파악하였다.

Table 2. Experimental conditions

Parameters	Value
Fuel temperature [°C]	-30, -25, -15, 0, 10, 40
Injection pressure [MPa]	30, 35, 100, 160
Injection duration [µs]	1000
Injection quantity [mg/stroke]	20
Injection timing for targeting	Main: 2.5 CAD BTDC 1 pilot: 11.8 CAD BTDC 2 pilot: 18.3 CAD BTDC

3. 시험 결과 및 논의

3.1 연료 온도 변화에 따른 분사량 특성

분사압 30 MPa 조건에서 연료 온도 및 분사 기간에 따른 분사량 측정 결과를 Fig.5에 나타내었다. 오차는 연료 온도가 40°C일 때를 기준으로 온도 변화 시 실제 분사되는 연료의 차이를 나타낸 것으로 아래와 같은 식(1)에 따라 계산되었다.

$$Error = \frac{Q_{inj@40^{\circ}C} - Q_{inj@T}}{Q_{inj@40^{\circ}C}} \times 100 [\%] \dots (1)$$

$Q_{inj@40^{\circ}C}$: actual fuel quantity under 40°C condition

$Q_{inj@T}$: actual fuel quantity under arbitrary temp. condition

분사 압력이 상승함에 따라 동일한 분사 기간을 인가하였을 때, 실제 측정된 분사량은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 분사압이 높을수록 연료에게 전달되는 모멘텀 에너지가 크므로 같은 분사기간 동안 더 많은 연료가 분사되기 때문이다. 또한 연료의 온도가 낮을수록 동일 분사기간 조건에서 분사량이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 저온 조건에서, 일반적으로 연료의 점도가 크기 때문에 인젝터의 니들과 유로를 통과하는 연료 사이의 마찰이 증가하여 동일한 시점에 분사 개시 신호를 인가하였음에도 불구하고, 실제 분사 개시 시점이 지연되어 요구 분사 기간보다 짧은 기간 동안 실제 분사가 이루어졌기 때문으로 판단된다. 그 결과 모든 분사압력, 분사

기간 조건에서 연료 온도가 낮아짐에 따라 실제 분사량이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 연료 온도 감소에 따른 분사량 오차는 분사압이 낮고, 분사기간이 짧을수록 커지는 경향을 보인다. 분사압 증가 시의 분사량 오차 수준의 감소는 분사압 증가에 따른 모멘텀 에너지 상승분이 연료 온도감소 시의 유로 내 저항 증가분 보다 지배적인 인자 작용함을 보여주는 것이라 판단된다. 이 결과는 연료 온도에 따른 분사량 보정 로직 구형 시 분사압에 대한 영향분이 함께 고려되어야 함을 의미한다. 또한 분사기간이 짧은 경우, 분사량 오차가 큰 것은 절대분사량 자체가 적은 영역이어서 오차 계산 시 영향을 미친 결과로 판단된다.

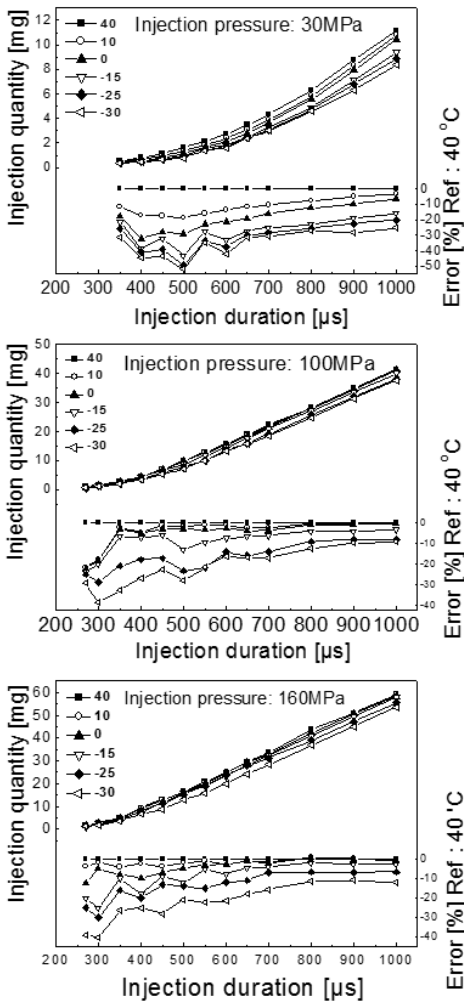


Fig. 5. Measured injection quantity with various fuel temperature

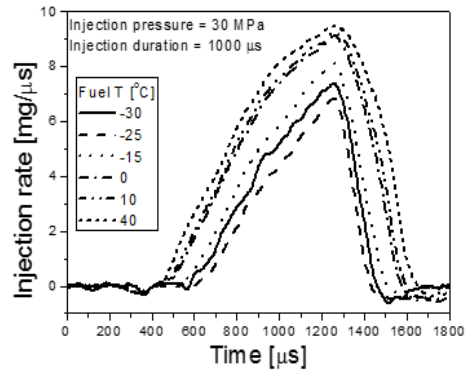


Fig. 6. Injection rate shape with various fuel temperature

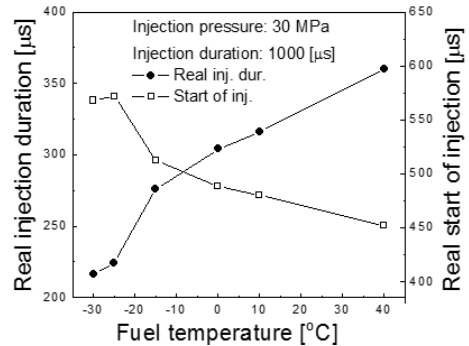


Fig. 7. Actual injection duration vs. real start of injection with various fuel temperature

3.2 연료 온도 변화에 따른 분사율 특성

Fig.6은 분사압 30 MPa, 분사기간 1000 μs 조건에서 측정된 연료 온도 별 분사율 측정 결과를 보여준다. 연료 온도가 낮아질수록, 동일 시점에서 분사 개시 인가 후 실

제 분사 시점이 지각되며, 분사율 최대값이 낮아지고, 분사 종료 시점이 지각되는 것을 확인할 수 있다. 이는 실제 분사량 측정 평가 결과에서 연료 온도 하향시의 분사량이 저감한 원인을 설명해준다. Fig.6의 분사율 측정 결과를 실제 분사시간 및 분사 개시 시점을 정량화하여 Fig.7에 나타내었다. 연료 온도 40℃ 대비 -30℃의 경우, 실제 분사 기간은 약 400 μs 짧아지며, 약 180μs 정도 실제 분사 개시 시점이 지각되는 것을 확인할 수 있다. 이는 엔진회전 속도 800 rpm 조건에서 약1 CAD에 해당한다. 본 분석 결과는 냉시동 조건을 포함하여 연료 온도 하강에 따라 분사량뿐만 아니라, 분사시기에 대한 보정을 고려해야할 필요성이 있음을 보여준다.

3.3 연료 온도 변화에 따른 거시적 분무 특성

거시적 분무 특성 평가를 위해 Table 3과 같이 분사 압력 35 MPa, 분사량 20 mg/st, 분사 시기 0, 7, 15 CAD BTDC로 분사 조건을 변경하여 연료 온도 변화에 따른 거시적 분무 발달 과정을 평가하였다. 각 분사시기의 정적 챔버 내부 분위기 압력, 온도, 밀도 조건은 1-D 시뮬레이션 툴 (WAVE, RICARDO)을 활용하여 모터링 운전 시를 가정하여 계산하여 Table 3에 나타내었다. Fig.8은 분사압 35 MPa, 분사시기 15 CAD BTDC 조건에서 연료 온도를 -30, 0, 40 ℃ 로 변경하였을 때, 분사 개시 후 1450 μs 지난 시점에서 측정된 거시적 분무 이미지를 보여준다. 연료 온도가 낮아질수록, 분무 도달 거리가 길어지는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. Fig.9에는 측정된 분무 이미지에 대한 분무도달거리를 도시하였다. 분무 발달 초기 단계 (분사 시작 ~ 900 μs)에서는 연료 온도에 따른 분무 도달 거리 간 차이가 미비한 것을 볼 수 있다. 하지만 분사 시작 후 900 μs 가 지난 시점부터는 연료 온도가 낮을수록 분무 도달 거리가 긴 것을 확인할 수 있으며 분무 말기 -30 ℃ 와 40 ℃ 온도 조건 비교 시 최대 11 mm가 차이 나는 것을 확인할 수 있다. 실제 엔진에서 인젝터 노즐 팁으로부터 실린더 라이너까지의 거리가 약 40 mm라고 가정할 경우, 이는 약 20%에 해당하는 수치로서 실제 연소 관점 큰 영향을 미칠 것을 예상할 수 있다. 분사 초기에는 분사압력에 의한 모멘텀 에너지가 연료온도에 관계없이 동일하므로 분무 도달 거리가 동등 수준으로 유지한 것으로 판단된다. 또한 분무 발달이 진행됨에 따라 연료의 모멘텀이 주변공기와의 운동량 교환에 의해 소멸해 감에 따라 냉간 온도

Table 3. Experimental conditions

Injection timing [CAD BTDC]	Pressure [MPa]	Temperature [K]	Density [kg/m ³]
0	4.6	412	23.2
-7	4.3	401	21.8
-15	3.2	353	17.5

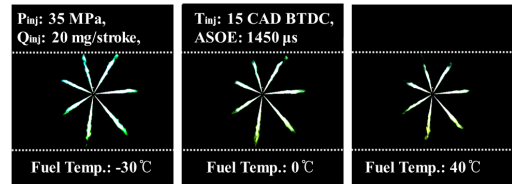


Fig. 8. Macroscopic spray images with different fuel temperature

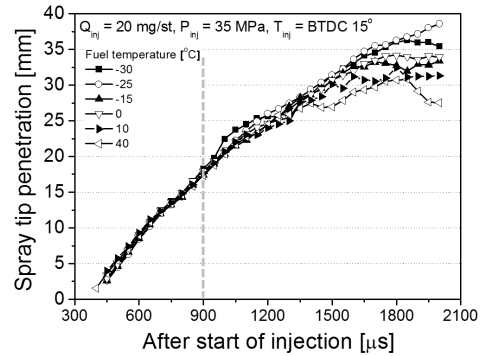


Fig. 9. Spray tip penetration with various fuel temperature

조건의 연료가 가지는 상대적으로 높은 점도로 인한 기화특성 악화로 분무 도달 거리에 차이가 발생한 것으로 판단된다.

3.4 냉시동 조건에서 분무 타겟팅 특성

저온 조건, 특히, 냉시동 조건에서 실제 연소 개선을 위한 전략으로 향후 적용 예정인 파일럿 분사에 대한 예비 시험으로서 파일럿 분사량 및 분사시기가 실제 연소실 내에서 미치는 영향을 파악하고자 분무 타겟팅 평가를 수행하였다. 이때 연료 온도 -30 ℃, 분사압 35 MPa 조건에서 주분사는 2.5, 제 1 파일럿은 11.8, 제 2 파일럿은 18.3 CAD BTDC에 각각 분사 시의 실린더 내부 온도, 밀도 조건을 정적 챔버 내부에 모사하였다. Fig. 10은평가 결과 이미지를 보여주고 있다. 주분사에 의해 분사된 연료는 분사 이후 850 μs시 까지 지속적으로 피스톤 림 및 보울 내부로 유입되고 있다. 또한 제1파일럿

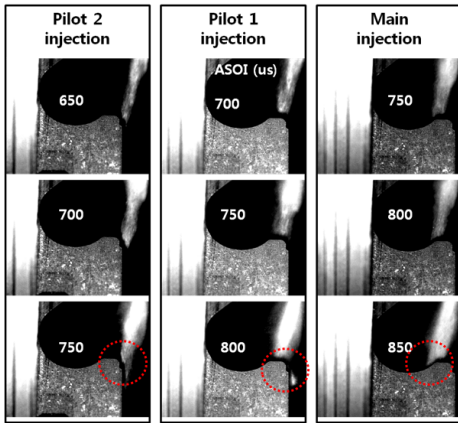


Fig. 10. Spray targeting with 1 & 2 pilot injection application under cold start condition

분사에 의한 연료 역시 피스톤 림 부에 타겟팅 되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 제2과일릿 분사에 의한 연료는 분사 개시 이후 700 가 지나면서 피스톤 크레비스 영역으로 유입되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 제2과일릿에 의한 연료는 상당부분 연소 과정에 참가하지 못하고 유해 배기가스로 배출될 여지가 높음을 예상할 수 있다. 따라서 과일릿 분사 적용을 통한 저온 조건에서의 연소 개선 평가 시에는 제2과일릿 분사량 최소화 및 분사시기를 최대한 지각하여 제1과일릿 분사에 의한 연소에 적극 참여할 수 있는 전략을 구현할 필요가 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 디젤 연료 온도의 변화가 연료의 분사량, 분사율, 분무 발달 특성에 미치는 영향에 대해 평가하였으며, 주요 결과는 아래와 같다.

- 1) 연료 온도가 낮을수록 동일한 분사압력, 분사 기간 조건 하에서 실제 분사량이 감소하며 이는 연료의 점도 증가에 기인한 것으로 판단된다.
- 2) 연료 온도가 낮을수록 실제 분사 개시 시점이 지각되며, 분사 기간이 짧아지는 것을 분사율 측정을 통해 확인하였다. 이는 실제 분사량이 감소하는 근거를 제시해준다.
- 3) 연료 온도가 낮아질수록 연료의 기화특성 악화로 인해 분무 발달 과정 중반부터 분무 도달 거리가 -30 °C 의 경우 40 °C 대비 최대 11mm 증가하는 것을 확인하였다.

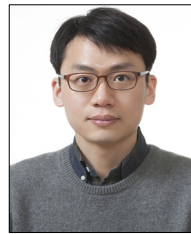
- 4) 분무 타겟팅 평가를 통해 과일릿 전략 적용 시 과일릿 분사시기 및 분사량 제어에 대한 필요성을 확인하였다.
- 5) 분사량, 분사율 평가 결과는 연료 온도에 따른 분사량 및 분사 시기 보정 로직 개선을 위한 기초 자료로서, 또한 거시적 분무 특성 결과는 향후 연소실 설계 시의 추가 고려 사항으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Heywood JB. Internal combustion engine fundamentals. p. 491-492, McGraw-Hill, 1988.
- [2] Z. Han, N. Henein, B. Nitu, W. Bryzik, “Diesel Engine Cold Start Combustion Instability and Control Strategy”, SAE International, 2001-01-1237, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2001-01-1237>
- [3] D. John, P. Ghodke, N. Gajarlawar, J. Joseph, “Experiences in Cold Start Optimization of a Multi Purpose Vehicle Equipped with 2.2L Common Rail Diesel Engine”, SAE International, 2011-01-0124, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2011-01-0124>
- [4] M. McGhee, P. Shayler, A. LaRocca, M. Murphy, “The Influence of Injection Strategy and Glow Plug Temperature on Cycle by Cycle Stability Under Cold Idling Conditions for a Low Compression Ratio, HPCR Diesel Engine”, SAE Int. J. Engines, Vol. 5, No. 3, pp. 923-937, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2012-01-1071>
- [5] K. M. Yeom, S. Y. Park, “Experimental Study on the Spray Characteristics of a Fuel Injector for a Non-Road Small Engine”, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 12, No. 5, pp. 2005-2010, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.5.2005>

이진우 (Jin-Woo Lee)

[정회원]



- 2007년 2월 : KAIST 기계공학부 (공학석사)
- 2011년 8월 : KAIST 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 8월 ~ 2015년 1월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

엔진 연소, 기관 성능 개발, 친환경 에너지 시스템