

냉시동 조건에서 디젤 연소 특성 및 연소 개선에 대한 연구

이행수, 이진우*
울산과학기술대학교 기계공학부

Improvement of Diesel Combustion using multiple injection under Cold Start Condition

Haeng-Soo Lee, Jin-Woo Lee*
School of Mechanical Engineering, Ulsan College

요약 디젤엔진은 저온 상태의 냉시동 조건에서 디젤 미립화 특성 악화로 인한 시동성 및 유해배출가스 생성의 문제를 안고 있다. 본 연구에서는 냉시동 시의 연소개선을 위한 방안으로 다단분사 전략 적용 시의 연소 특성을 파악하고자 하였다. 본 연구에서는 냉시동성 개선을 위해 방안으로 다단분사 적용 시의 연소 특성을 파악하고자 하였다. 정적 연소 챔버 내에 설치한 압력센서를 이용하여 취득한 연소압 및 열방출율, 직접 화염 가시화기법을 적용한 화염강도를 이용하여 연소현상을 분석하고자 하였다. 시험 결과 단일 분사 대비하여 다단 분사 적용 시, 주분사에 의한 최대 연소압력 및 열방출 상승률이 증가하며, 주분사에 의한 화염 감지 시간이 단축됨을 확인하였다. 과일릿 분사량 변경을 통해 분사량 증대 시 과일릿 연소에 의한 열방출 향상에 기인한 주분사에 의한 연소가 개선됨을 확인하였다. 또한 분사압력 증대 시 연료 미립화 개선으로 인한 연소개선을 화염 강도 증대를 통해 확인할 수 있었다. 다만 분사량 및 분사압 증대는 벽면적심현상으로 인한 HC, CO의 배출 수준 악화를 초래할 수 있으므로, 실제 엔진 개발 시 이에 대한 정밀한 선정이 필요할 것으로 판단된다.

Abstract Startability and harmful emissions are the main issues in diesel engine development under cold conditions. The characteristics of combustion with multiple injection were investigated under cold start conditions. For quantitative analysis, the in-chamber pressure profile was measured and combustion visualization using direct imaging was accomplished. With multiple injection, the peak in-chamber pressure and heat release rate were increased compared to single injection. In addition, the period of flame luminosity detection was shortened using multiple injection. Combustion by main injection was improved with an increase in heat released by pilot combustion when the pilot injection quantity was increased. Finally, an increase in injection pressure also showed the possibility of combustion improvement. On the other hand, an increase of in the pilot injection quantity and injection pressure can cause an increase in harmful emissions, such as HC and CO due to wall wetting. Therefore, more sensitive calibration will be needed when applying a multiple injection strategy under cold start conditions.

Keywords : Cold start; Combustion visualization; Diesel combustion; Multiple injection; Spray targeting

1. 서론

압축 착화 방식에 의한 디젤 연소 과정은 연료와 공기
의 혼합 정도에 주로 영향을 받는다[1]. 따라서 연료의
미립화 특성이 연소 안전성 관점에서 중요한 역할을 한

다. 일반적인 저온 상태의 냉시동 조건에서는 디젤 미립
화 특성 악화로 기인한 시동성 문제 발생 여지가 있다
[2]. 또한 이로 인해 시동 과정에서 불완전 연소 생성물
인 미연탄화수소 (Unburned hydrocarbon, UHC)와 일산
화탄소 (Carbon monoxide, CO)가 다량으로 배출되며,

본 논문은 2016년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행됨

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

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

Received January 13, 2017

Revised February 7, 2017

Accepted April 7, 2017

Published April 30, 2017

이는 냉시동 시 연비악화의 원인이 된다. 따라서 냉시동 조건에서의 연소개선은 엔진 개발의 주요 목표 중 하나이다[3-4]. 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 [5-8]. 하지만, 연소현상에 대한 근본적인 개선을 위해서는 연료 온도에 따른 분무 특성에 대한 고찰이 선행되어야 한다[9]. 이에 본 연구자는 넓은 디젤 연료 온도범위 (-30~40 °C) 내에서 연료 온도 변화가 실제 분사량, 분사율 및 거시적 분무 발달 과정에 미치는 영향에 대해 연구를 수행한 바 있다[10]. 본 연구에서는 이에 대한 후속 연구로서 냉시동 조건을 모사한 저온 조건에서 챔버 내 연소를 구현하여 가시화 기법 등을 통해 현상을 분석하고, 다단 분사 기법을 적용함으로써 연소개선 가능성을 모색하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 연료 분사 시스템

제노발티 (Zenobalti Co.)의 인젝터 드라이버 (IDU) 를 사용하여 분사기 고유의 전압/전류 과형 제어를 통해 peak & hold 전류 특성을 구현하여 디젤 솔레노이드 타입 인젝터를 구동하였다. 연료의 분사압력은 압력제어밸브 (PCV) 드라이버를 통해 제어하였으며, 분사시간 및 분사 시기 변경을 위해 전용 인젝터 제어 장치를 사용하였다. Fig. 1은 연료 분사 시스템의 개요도를 나타낸다. 연료를 15kW급 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 단열체로 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.

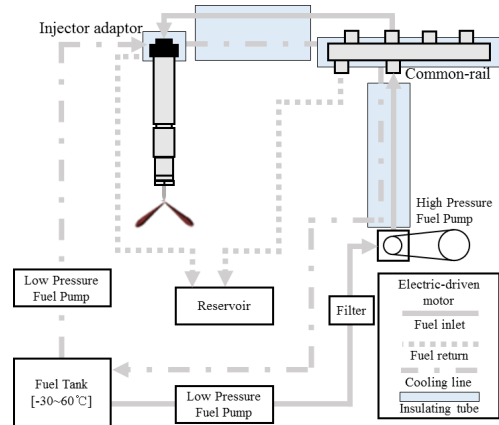


Fig. 1. The schematic of fuel injection system

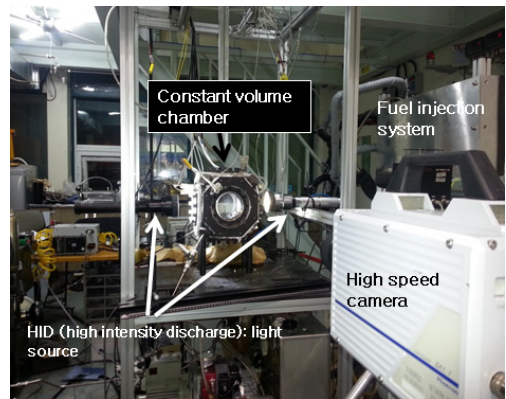
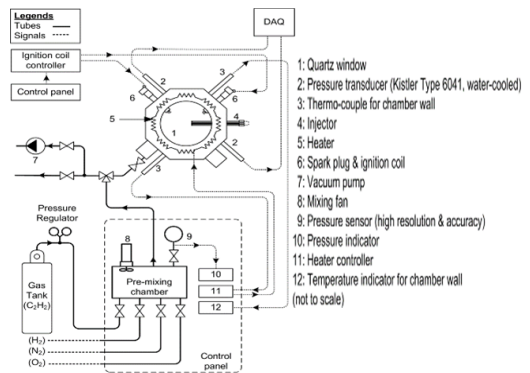


Fig. 2. The schematic (top) and picture (bottom) of constant volume chamber for combustion visualization with fuel temperature change

2.1.2 연소압 및 연소 가시화 측정 장치

Fig. 2는 시험 조건에 따른 연소압력 및 가시화 계측을 위한 장치도를 보여주고 있다. 연소를 위한 정적챔버는 5개의 96mm 직경을 가진 석영 창으로 구성하였다.

아세틸렌, 수소, 산소, 질소 혼합가스를 예혼합 챔버를 통해 정적 챔버로 유입 시킨 후, 열전대를 이용하여 챔버 내 온도를 473K까지 가열시켰다. 이후 2개의 스파크 플러그를 통해 예연소 시킨 후 챔버 내 온도 하강 중 목표 조건에 도달하였을 때 연료를 분사하였다. 이때의 연소 과정은 연소압력센서를 통해 계측되었으며, 연소로 인한 연소압력은 연소 시 압력변동과 예혼합 연소 단독 조건의 압력의 차를 이용하여 취득할 수 있었다(Fig. 3). 또한 석영 창에 HID 램프 및 고속카메라 (Photron, FASTCAM SA1.1)를 설치하여 연소 과정을 초당 8200 프레임의 속도로 이미지로 취득하였다. 취득한 이미지는 아래 식(1)과 같이 화염강도를 정규화(normalization)하여 시험인자에 따른 분석을 수행하였다.

$$\bar{I} = \frac{\sum_i \sum_j I_{i,j}}{N} \quad (1)$$

\bar{I} : averaged luminosity intensity over the flame field [a.u.]

$I_{i,j}$: Flame intensity at pixel position (i, j) [a.u.]

N : pixel number

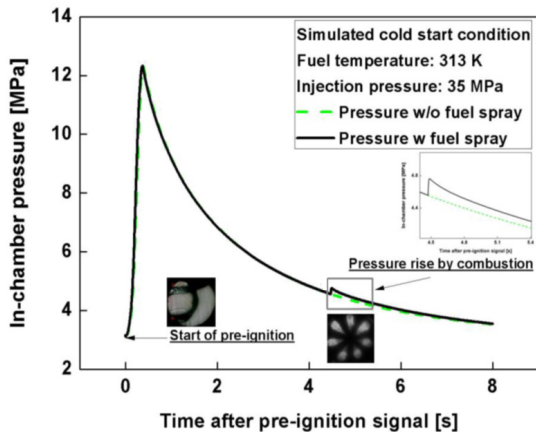


Fig. 3. In-chamber pressure profile w & w/o combustion

2.3 실험 조건

냉시동 조건에서 다단분사 적용에 따른 연소 특성 평가를 위해 Table 1과 같이 연료 온도, 분사압력, 분사시기, 분사량, 파일럿 분사시기에 대한 인자의 영향도를 파악하였다. 또한 Table 2에는 냉시동 및 상온 시동 조건 시 챔버 내부 온도, 압력, 밀도 조건을 나타내었다.

Table 1. Experimental conditions

Parameters	Value
Fuel temperature [°C]	-30, 0, 40
Injection pressure [MPa]	35, 45
Injection quantity	Total: 38 mg/str. 1Pilot: 545~800 μs 2Pilot: 516~800 μs
Injection timing	Main: 2.5 CAD BTDC 1 pilot: 2500 μs 2 pilot: 4250 μs

Table 2. Ambient condition inside the chamber

@Main injection	Cold start	Soaking
Pressure [MPa]	4.51	4.39
Temperature [K]	684	815
Density [kg/m]	23	18.8

3. 시험 결과 및 논의

3.1 시동조건(냉시동/상온시동)에 따른 연소 특성

Fig. 4는 시동 조건에 따른 연소압력 및 열방출율 선도를 분사시기에 따라 도시한 그림을 보여준다. Fig. 4는 시동 조건에 따른 연소압력 및 열방출율 선도를 보여준다. 동일한 연료온도, 분사압 및 분사전략을 적용한 상태에서 냉시동과 상온시동 조건에 따른 연소 평가를 진행하였다. 냉간 시동 시 대비하여 상온 시동 조건에서 최대 연소압력이 약 0.9 bar수준 높게 발생하며, 연소압력 및 열방출의 상승률이 빠른 것을 확인할 수 있다. 이는 주 분사 이전에 인가된 파일럿 분사에 의한 연소가 불완전하였기 때문으로 판단된다. 파일럿 분사에 의한 연소 착화 지연에 대한 보다 정량적인 해석을 위해 동일 운전 조건에서의 화염가시화 결과를 분석할 필요가 있으며, 이 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 화염이미지로부터 냉시동 조건의 경우, 제2파일럿에 의한 화염이 확인 되지 않으며, 전반적으로 낮은 수준의 화염강도를 보이고 있다. 또한 Fig. 5의 하단에 있는 분석 그래프로부터, 냉시동 조건의 경우, 전반적인 낮은 수준의 화염 강도 및 주 분사에 의한 연소를 위한 점화지연이 증가되었음을 확인할 수 있다.

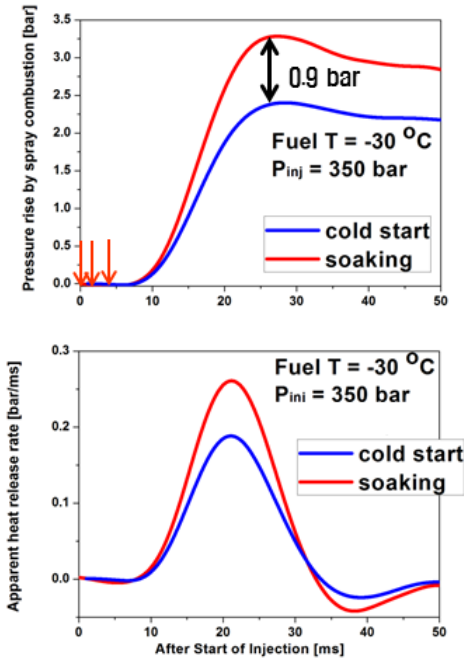


Fig. 4. In-chamber pressure (top) and heat release rate (bottom) under cold start and soaking condition with the

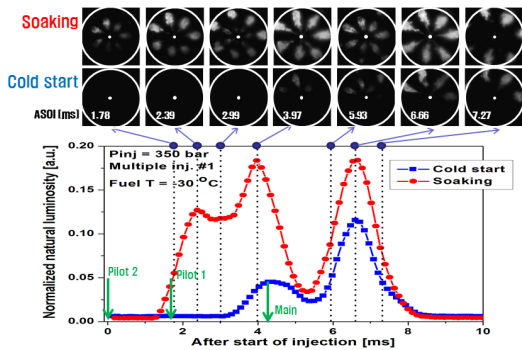


Fig. 5. Combustion visualization result (top) and luminosity (bottom) for cold start and soaking condition with the same input parameters

3.2 분사 횟수에 따른 연소 특성

상온 대비 냉시동 조건에서의 연소 악화를 확인하였으며, 이에 대한 개선 전략으로서 분사횟수 변경에 따른 연소 현상을 파악해 보았다. Fig. 6은 냉시동 조건에서 단일분사 및 다단 분사 적용시의 연소압력 및 열방출 선도를 보여준다. 다단분사 적용 시 연소최대압력이 0.55 bar 수준 증가하며, 빠른 압력 상승 및 높은 열방출율을

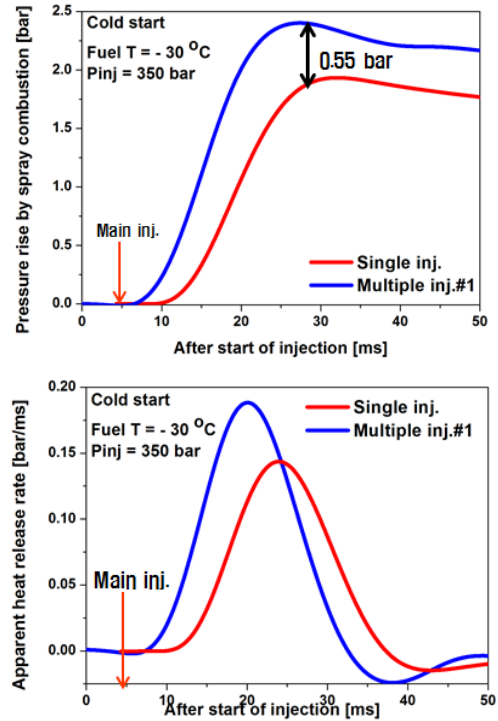


Fig. 6. In-chamber pressure (top) and heat release rate (bottom) for single and multiple injection strategy under cold start condition

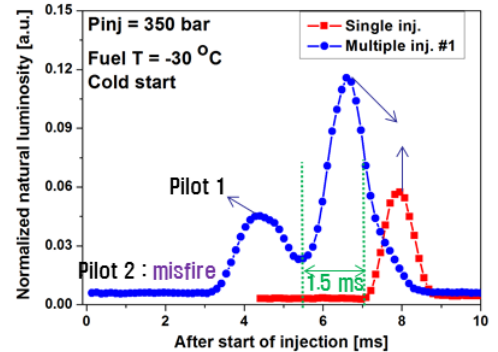


Fig. 7. Comparison of normalized flame luminosity between single and multiple injection strategy under cold start condition

보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 화염이미지 분석 결과를 보여주는 Fig. 7로부터 제2 파일럿 분사에 의한 연소가 낮은 주변 온도 조건으로 인해 발생하지 않았음에도 불구하고 제1 파일럿 분사에 의한 연소로 인해 주분사에 의한 화염 발생 시기가 진각되고 화염 강도가 증가되는 것을 확인할 수 있다. 단일 분사 대비 다단 분사 적용 시

주 분사에 의한 화염 감지 시점이 약 1.5ms 진각되는데, 이는 일반적인 냉시동시의 엔진회전속도인 620rpm 조건에서 5.6CAD에 해당하는 값으로 냉시동 안정성 확보에 다단분사 적용이 매우 유리한 전략임을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

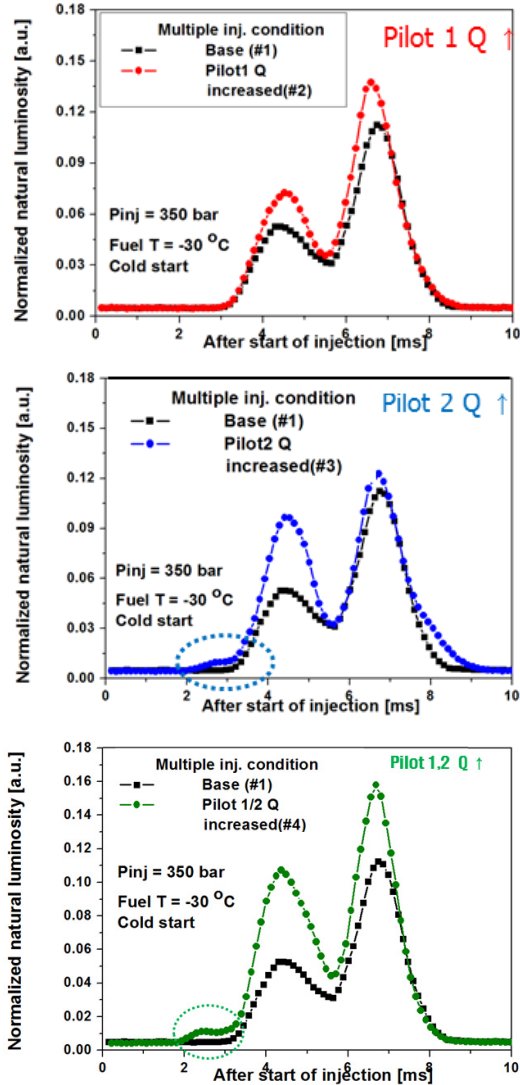


Fig. 8. Comparison of normalized flame luminosity with pilot injection quantity variation under cold start condition (top: 1st pilot quantity increase case, middle: 2nd pilot quantity increase case, bottom: 1st and 2nd pilot quantity increase case)

3.3 파일럿 분사량 변화에 따른 연소 특성

단일 분사 대비 다단 분사 적용 시의 확인한 연소 개선에 대한 추가 작업으로서 파일럿 분사량 변경 시의 연소 특성을 확인하였다. Fig. 8은 3.2단락에서 적용한 다단분사 조건을 기본으로 하여 (1) 제1 파일럿 분사량을 증대 (2mg/stroke), (2) 제2 파일럿 분사량을 증대 (3mg/stroke), (3) 제1 및 2 파일럿 분사량 전체 증대 조건 적용시 각각에 대한 연소 가시화 분석 결과를 보여준다. Fig. 8의 최상단 그림을 통해 제1 파일럿 분사량 증대 시, 제1 파일럿 자체에 의한 화염 강도가 증가하며, 이로 인한 주분사의 화염 감지 시점 진각 및 강도 증대를 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8의 가운데 그림을 통해 제2 파일럿 분사량을 통해 기본 조건에서 보이지 않았던 제2 파일럿 분사에 의한 화염이 감지됨을 알 수 있다. 또한 이로 인한 주변 온도 조건 상승으로 인해 제1 파일럿 분사에 의한 연소가 기본 조건 대비 활발하게 발생함을 확인할 수 있다. 마지막으로 제1, 2 파일럿 분사량을 모두 증대한 Fig. 8의 최하단 그림으로부터 1, 2 파일럿 분사에 의한 연소 개선으로 인해 주분사에 의한 화염 강도가 모든 조건 대비 가장 큰 값을 보이며, 화염소멸 시점이 진각됨을 확인할 수 있다. 이는 주분사에 의한 연소효율 개선이 향상되었음을 보여주는 결과이다. 하지만 제2 파일럿 분사 시, 연소 주변 온도, 압력 조건이 연소에 불리한 조건이므로 단순 분사량 증대 시, 벽면적심 현상 및 불완전 연소되는 연료량 증대로 인해 HC, CO 증가분에 대한 보다 정량적인 분석이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

3.4 분사압력 변화에 따른 연소 특성

냉시동 조건에서 다단분사 적용 시 분사량 외에 분사압력 변화 시의 연소특성을 파악하기 위해 350 bar 초기 조건 대비 450 bar로 분사압력 증대 시의 연소압력 및 화염 가시화 분석 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 일반적으로 분사 압력 증대 시, 연료 액적 분열 및 주변 공기 유입률 증대 등으로 인해 연료 기화 특성이 향상되는 것으로 알려져 있다[1]. 본 평가 결과에서도 분사압력을 100 bar 수준 증대 시, 혼합기 형성 개선으로 인한 연소개선에 의해 최대 연소 압력이 높아지는 것을 Fig. 9의 상단 그림을 통해 확인할 수 있다. 또한 Fig. 9의 하단으로부터 파일럿 분사에 의한 화염 강도가 2배 이상 강화되며, 화염 감지 시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 다만, 실

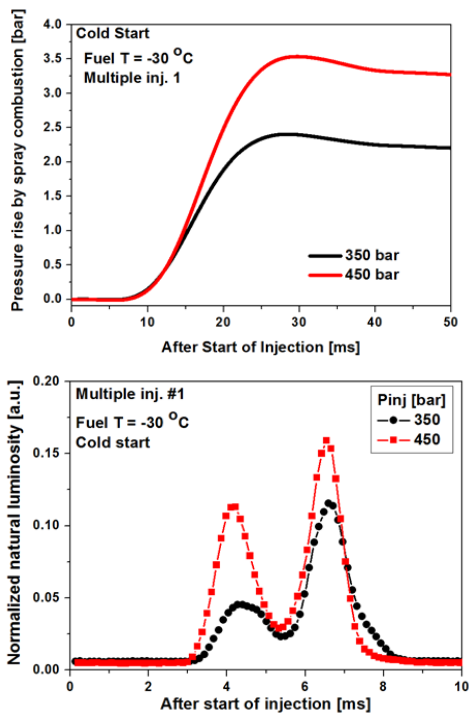


Fig. 9. In-chamber pressure and normalized flame luminosity for different injection pressure under cold start condition

제 엔진 개발에 적용 시 주변 밀도가 낮은 파일럿 분사 조건에서 분사 압력 증대로 인한 분무 도달 거리가 증가로 벽면적심현상이 악화되어 HC 배출이 증가될 수 있으므로, 이에 대한 고려가 필수적으로 수반되어야 할 것으로 판단된다.

3.5 냉시동 조건에서 분무 타겟팅 특성

정적 연소 챔버 내부에서 수행한 냉시동 연소 개선 전략 적용 시의 고려 사항으로 제기된 벽면적심 현상 등을 확인하기 위해 분무 타겟팅 평가를 진행하였다. Fig. 10은 평가 결과 이미지를 보여주고 있다. 주분사에 의해 분사된 연료는 분사 이후 850 μ s까지 지속적으로 피스톤 림 및 보울 내부로 유입되고 있다. 또한 제1 파일럿 분사에 의한 연료 역시 피스톤 림 부에 타겟팅 되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 제2 파일럿 분사에 의한 연료는 분사 개시 이후 700 μ s가 지나면서 피스톤 크레비스 영역으로 유입되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 제2 파일럿에 의한 연료는 상당부분 연소 과정에 참가하지 못하고 유해 배기가스로 배출될 여지가 높음을 예상할 수 있다. 따

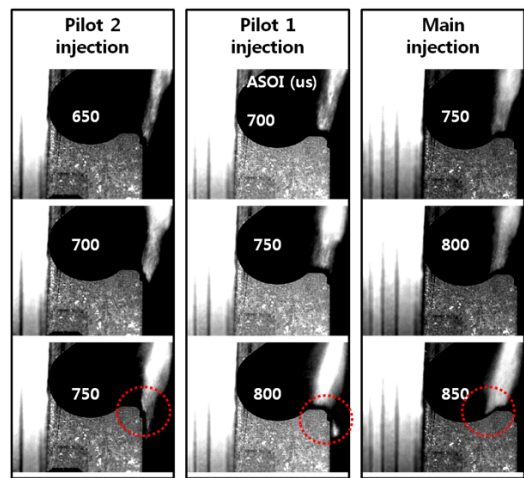


Fig. 10. Spray targeting with 1 & 2 pilot injection application under cold start condition

라서 파일럿 분사 적용을 통한 냉시동 포함 저온 분위기 조건에서의 연소 개선 시도 시에는 제2파일럿 분사량을 최소화 하여 분사시기를 최대한 지각하여 제1파일럿 분사에 의한 연소 개선에 적극 참여할 수 있는 방향으로 전략을 구현할 필요가 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 냉시동 조건에서 다단분사 적용 시의 연소 개선 수준을 파악하고, 분사 인자 변경에 따른 영향도에 대해 평가하였으며, 주요 결과는 아래와 같다.

- 1) 다단 분사 적용 시, 단일 분사 대비하여 연소 압력 상승률 및 연소 화염 강도가 증가하며, 주 분사에 의한 착화지연이 약 1.5ms 정도 짧아짐을 확인하였다.
- 2) 파일럿 분사량 증대 시, 파일럿 및 주분사에 의한 연소 개선을 화염 이미지 분석을 통해 확인하였다. 다만, 제2파일럿 분사에 의한 벽면적심현상에 대한 정량적인 추가 분석이 요구된다.
- 3) 분사압력 증대 시 연료 미립화 향상으로 인해 냉시동성이 개선됨을 확인하였다. 하지만 분무도달 거리 증가로 인한 HC, CO 발생 증대를 고려하여야 할 것으로 판단된다.
- 4) 분무 타겟팅 평가를 통해 파일럿 전략 적용 시 제2 파일럿 보다는 제1파일럿 분사량을 증가시키는 것

이 연소 개선에 유리할 것임을 확인하였다. 다만, 제2과일릿 분사는 대부분 실화되는 경향이 있으므로 분사압 가변 기능 인젝터 등의 적용을 통한 추가 연소 개선 방안 모색이 요구된다.

References

- [1] Heywood JB. Internal combustion engine fundamentals. International editions. 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: <https://doi.org/10.4271/2012-01-1071>
- [5] D. I. Andrianov, C. Manzie and M. J. Brear, "A Methodology for Minimising Emissions Constrained Cold Start Fuel Consumption", SAE Int. J. Engines, Vol. 5, No. 3, pp. 923-937, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2012-01-0894>
- [6] R. Mamat, N. R. Absullah, H. Xu, M. L. Wyszynski and A. Tsolakis, "Effect of Fuel Temperature on Performance and Emissions of a Common rail Diesel Engine Operating with Rapeseed Methyl Ester (RME)", SAE Technical Paper, 2009-01-1896, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2009-01-1896>
- [7] R. A. Giannelli, R. Stubleski and A. Saunders, "Semi-empirical Analysis of Cold Start Emissions", SAE Technical Paper, 2014-01-1619, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2014-01-1619>
- [8] D. J. Pundlik, N. Gajarlawar and J. Joseph, "Experiences in Cold Start Optimization of a Multi-Purpose Vehicle equipped with 2.2 L Common Rail Diesel Engine", SAE Technical Paper, 2011-01-0124, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2011-01-0124>
- [9] 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: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.5.2005>
- [10] J. W. Lee, "Characteristics of the Spray Development with Diesel Fuel Temperature", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 17, No. 3, pp. 270-275, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.3.270>

이 행 수(Haeng-Soo Lee)

[정회원]



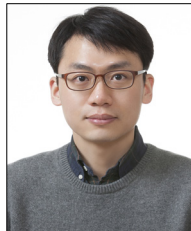
- 1990년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1995년 8월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 1995년 9월 ~ 2008년 2월 : 삼성전자 수석연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 기계공학부 부교수

<관심분야>

구조해석, 패키징신뢰성해석

이 진 우(Jin-Woo Lee)

[정회원]



- 2005년 2월 : 서울대학교 생물자원공학과 (공학사)
- 2007년 2월 : KAIST 기계공학부 (공학석사)
- 2011년 8월 : KAIST 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 8월 ~ 2015년 1월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 기계공학부 조교수

<관심분야>

엔진 연소, 기관 성능 개발, 친환경 에너지 시스템