Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 20, No. 10 pp. 33-39, 2019

https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.10.33
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

대형 디젤 엔진에서 최적 성능 도출을 위한 연료 분사 전략에 관한 연구

이진우
울산과학대학교 기계공학부

Fuel Injection Strategy for Optimized Performance in Heavy-Duty Diesel Engine

Jin-Woo Lee
School of Mechanical Engineering, Ulsan College

요 약 대형 디젤 엔진에서 NOx, Smoke 등의 배기가스 저감과 연비를 개선하는 것은 주요한 개발 목표이다. 이 목표를 달성하기 위한 다양한 방식 중 연료를 분할하여 분사하는 다단 분사 전략은 주요하게 적용되고 있다. 본 연구에서는 다양한 조건의 다단분사 전략을 적용하여 배기가스, 연비 그리고 연소 소음 관점에서 최적의 성능을 확보할 수 있는 조건을 확인하여 개선정도를 확인하고자 하였다. 1단 파일럿 적용 시, 단일 분사 대비 NOx 저감이 가능한 영역이 있으나, Smoke가 악화되는 문제가 확인되었다. 2단 파일럿 적용 시, 최대 NOx와 Smoke를 각각 73%, 84%까지 저감할 수 있었다. 연소 소음은 최대 압력 상승률 분석을 통해, 또한 연료소비율은 도시 연료 소비율을 계산하여 단일 분사와 비교하여 개선수준을 평가하였다. 이를 통해 15%:15% 2단 파일럿 전략 적용 시, 단일 분사 대비 NOx 32.9%, Smoke 60.4%, 연비 1.95%, 연소소음 19.3%의 개선을 이룰 수 있음을 확인하였다. 향후, 본 연구 결과를 기반으로 운전 영역을 확장하여 각 조건에서의 최적 연료 분사 방식 도출을 통해 전체적인 성능개선을 구현하고자 한다.

Abstract The improvement of emissions, fuel economy, and combustion noise is a primary target in the development of heavy-duty diesel engines. Multiple injection has been introduced as one of the most promising strategies for this goal. In this research, various multiple injection methods were applied to achieve the optimal strategy in terms of emissions, fuel economy, and combustion noise. In the case of one pilot injection, the smoke emission deteriorated, while the NOx emission was reduced. In the case of 2 pilot injections, the NOx and smoke emissions were reduced by 73% and 84%, respectively. In this case, the combustion noise was analyzed with the maximum pressure-rise rate, and the fuel economy was evaluated with the help of the indicated specific fuel consumption. A 15%:15% 2-pilot injection strategy accomplished improvements of 32.9% for NOx, 60.4% for smoke, 1.95% for fuel consumption, and 19.4% for combustion noise compared to the case of single injection. Based on the data, an optimal injection strategy will be developed for a greater operating range in future work.

Keywords : Diesel Combustion, Multiple Injection, Emission, Fuel Consumption, Combustion Noise

이 논문은 2018년 울산과학대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행됨
*Corresponding Author : Jin-Woo Lee(Ulsan college)
email: jwlee2@uc.ac.kr
Received July 15, 2019 Revised August 7, 2019
Accepted October 4, 2019 Published October 31, 2019

1. 서론

디젤 엔진은 수송 분야에서 가솔린 엔진 대비 높은 열효율과 토크를 장점으로 중추적인 기관으로 활용되고 있다[1,2]. 반면, 압축 행정 말기의 고온, 고압 분위기 조건에서 연료를 연소실 내로 분사하고, 이 연료는 주변 공기와의 혼합 및 증발 과정을 거쳐 착화에 이르게 된다. 이 과정에서 연소실 내 혼합기는 공간적으로 불균일한 당량비를 가지게 되며 이로 인해 가솔린 엔진에 비해 다량의 질소산화물(NOx)과 입자상물질(PM)이 발생되는 문제를 가지고 있다. 최근 세계적으로 환경 문제가 대두되면서 디젤 엔진으로부터의 NOx와 PM 배출가스에 대한 규제를 강화하고 있어, 이에 대한 저감을 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 다양한 방법론 중 연료를 한 사이클 내에서 2회 이상 분할하여 분사하는 다단분사 방식은 그 대표적인 전략으로 소개되고 있다[3-7]. 기존 연구에서는 주로 다단 분사 적용 시의 배출가스 저감 관점의 정량적 개선율 및 그 작동 기구에 대한 연소압력 및 연소 가시화를 통한 해석을 주로 다루고 있다. 하지만, 실제 엔진 개발 시에는 배출가스 저감 외에도 차량의 상품성 관점에서 연비와 연소 소음도 함께 고려하는 바, 본 연구에서는 다양한 조건에서 다단분사 적용 시, 최적의 성능을 확보할 수 있는 정도에 대한 기초 연구를 수행하여 향후, 적용 범위를 확대하는데 활용하고자 한다.

2. 본론

2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 실험 장치의 개략도 및 제원을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 엔진은 배기량 1818cc, 압축비 17:1인 단기통 직접분사식 디젤 엔진을 사용하였다. 연료분사는 최대 1800bar 범위에서 제어가 가능한 커먼레일 시스템 (Zenobalti Co., IDU 5000B)을 활용하였으며, 적용한 인젝터는 Bosch사의 Solenoid구동 방식으로, 8홀, Sac타입이며 유량은 860cc/30s이며, 146°의 분사각을 가지고 있다. 단기통 엔진을 구동하기 위해 동력계 (DC dynamometer, 90kW)를 크랭크축에 연결하여 엔진회전수를 제어하였다. 분사시기는 엔진의 캠 축에 장착한 엔코더 (Autonics, 3600 pulse/revolution) 신호를 기반으로, 분사량은 인젝터 구동 장치 (TDA 3200, TEMS Ttd)를 통해 제어하였다. 압력센서 (KISTLER, 6043Asp)로부터 총 100 사이클 동안 매 0.2 CAD (crank angle degree) 마다 취득한 연소실의 내부 압력의 평균값으로부터 열방출율을 계산하였다. 배기가스 분석장치 (HORIBA MEXA 1500D)와 AVL Smoke meter (415S G002)를 사용하여 NOx와 스모크(Smoke) 값을 측정하였다.

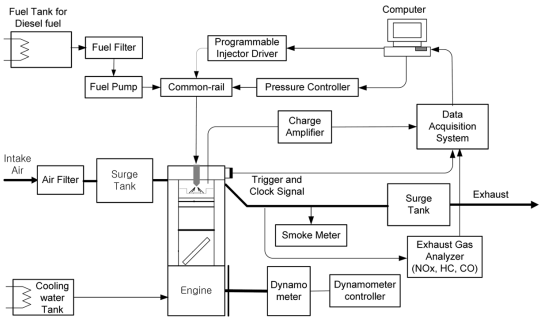


Fig. 1. Schematic diagram of experimental facility

Table 1. Engine specification

Engine	Single-cylinder, direct injection, four-valves, optical diesel engine
Bore × Stroke [mm]	128 × 142
Displacement [cm^3]	1817.6
Compression ratio	17:1
Max. Power [PS]	420
Max. Torque [N·m]	1833
Max. Speed [rpm]	1900
Fuel injection type	Common-rail injection system (up to 1800bar)
Injector	8 holes, HFR(hydraulic flow rate) 860cc/30s, injection angle 146°

2.2 실험 조건

Table 2는 본 연구에서 적용한 실험 조건을 보여준다.

Table 2. Experimental conditions for multiple injection strategy

Engine speed [rpm]	1200
Injection quantity [mg/stoke]	60
Single pilot injection quantity [mg/stroke]	6, 18, 30
Double pilot injection quantity for 1st and 2nd pilot injection [mg/stroke]	9, 15
Main injection timing [CAD ATDC]	-20
Single pilot injection timing [CAD BSOI]	10, 20, 30, 40, 50, 60, 80
Double pilot injection timing [CAD 1BSOI/2BSOI]	10, 20, 30, 40, 50, 60, 80/ 10, 30, 50

엔진 회전 속도는 1200 rpm, 총 분사량은 60 mg/stroke 조건에서 운전하였으며, 이는 본 실험에 사용된 엔진의 중속, 중부하 조건을 대표한다. 실험 과정 중 온전히 다단 분사만의 효과를 파악하기 위해 배기가스 재순환은 적용하지 않았다. 다단 분사 적용 시에도 총 분사량은 단일분사 시와 일정하게 분사하였다. 이를 위해 분사 조건 별 총 500회 분사 실측치의 평균값의 단일 분사시의 분사량과 비교하였다. 1단 파일럿 분사의 경우, 분사량 변화에 대한 영향도를 살펴보기 위해 총 분사량의 10% (6mg/stroke), 30% (18mg/stroke), 50% (30mg/stroke)로 변화시켰으며, 분사시기의 영향도를 함께 살펴보기 위해 각각의 1단 파일럿 분사량 조건에서 주 분사시기 기준으로 10 CAD에서 80 CAD까지 변화시켜가면서 이른 시기에 분사하였다. 1단 파일럿 분사시기의 단위는 주 분사시기 보다 얼마나 이른 시기에 분사했는지를 보이기 위해 BSOI (before start of main injection)라는 단위를 새로이 정의하였다. 2단 파일럿 분사의 경우, 제 1 파일럿 분사량과 제 2 파일럿 분사량은 동일하게 고정하였다. 2단 파일럿 적용은 1단 파일럿 분사를 재 분할 하였을 시의 영향을 파악하기 위함이기 때문에

30%, 50% 1단 파일럿 분사를 각각 절반씩 분사하는 전략을 구현하였다. 즉, 2단 파일럿 분사량은 총 분사량의 15% (9 mg/stroke), 25% (15 mg/stroke)로 조절하였으며, 제 1 파일럿과 제 2 파일럿의 분사시기를 달리하여 연소 및 배기 특성을 파악하고자 하였다. 2단 파일럿 분사시기는 1st BSOI와 2nd BSOI로 정의하였으며, 이는 각각 1st pilot injection before start of 2nd pilot injection과 2nd pilot injection before start of main injection을 의미한다. 각 분사 방식의 분사시기에 대한 이해를 돕기 위해 아래 Fig. 2에 보쉬법을 통해 측정한 분사율 형상을 근거로 나타내었다.

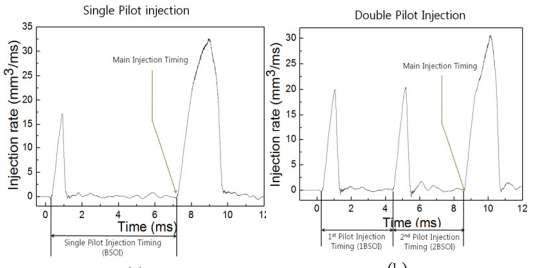


Fig. 2. Injection profile for (a) Single pilot injection (b) double pilot injection

3. 본론

3.1 배출가스 관점

Fig. 3는 본 실험에 적용된 모든 조건으로부터 얻은 NOx와 Smoke값을 한 평면에 도시하고, 단일 분사 결과 대비 NOx와 Smoke값이 모두 우수한 영역을 덧칠하였다. 파일럿 분사 시기가 주 분사 시기와 가까운 일부 조건에서 단일 분사보다 NOx는 저감시킬 수 있었으나, 많은 Smoke가 배출되었다. 또한 25%:25% 2단 파일럿 조건에서 제2파일럿 분사 시기가 주 분사 시기와 10 CAD로 가까운 조건에서 단일 분사 대비 Smoke는 감소하였으나, NOx의 배출이 증가하는 경향을 보였다. 하지만, 다단 분사를 적용한 대부분의 조건에서 NOx와 Smoke를 동시에 저감시킬 수 있었으며, 최대 각각 73%, 84%까지 저감이 가능하였다. 또한 파일럿 분사에 적용되는 분사량의 증가, 파일럿 분사의 분할 분사, 파일럿 분사 시기의 진각이 NOx와 Smoke 동시 저감 폭을 증가시키는 주요 분사 방식 전략인 것을 확인할 수 있다[3].

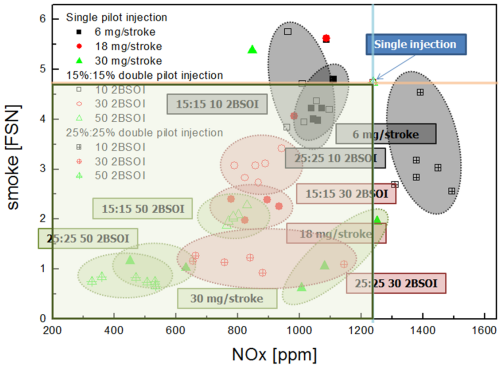


Fig. 3. NOx and smoke emission considering single injection and multiple injection from all the experimental conditions

3.2 연소 소음 관점

일반적으로 엔진에서의 연소 소음을 측정하는 것은 매우 어려운 일이기 때문에 연소실 압력을 측정을 통해 얻은 최대 압력 상승율로부터 연소 소음 정도를 판단한다[8]. 또한 허용 가능한 적정 연소 소음은 최대 압력 상승율 값은 5 bar 수준이라 알려져 있다 [9]. 이에 Fig. 4에 다단 분사 방식에 따른 최대 압력 상승율 및 본 연구에서 허용치 한계로 설정한 5 bar를 기준으로 나타내었다.

1단 파일럿 분사 적용 시 파일럿 분사량이 적고, 분사

시기가 주 분사시시와 가까워 질수록 최대 압력 상승율은 감소하는 결과를 Fig. 4(a)에서 확인할 수 있다. 이 경우, 최고 2.7 bar 수준으로 최대 압력 상승율을 저감시킬 수 있었다. 하지만 파일럿 분사량이 증가하고 주 분사 시기와 근접한 시기에 분사할수록 소음 수준은 악화되는 경향을 보였다. 15%:15% 2단 파일럿 분사의 경우, 대부분의 조건에서 5 bar 이하의 수준으로 최대 압력 상승율을 저감시킬 수 있었다. 또한 제2파일럿 분사시기가 30 CAD 2BSOI인 경우, 제1 파일럿 분사 시기에 관계 없이 3 bar 수준으로 저감이 가능한 특징을 보였다. 하지만 25%:25% 2단 파일럿 분사 방식의 경우, 15%:15% 2단 파일럿 분사 적용에 비해 최대 압력 상승율 개선 효과가 감소하는 경향을 Fig. 4(b)(c)를 통해 알 수 있다. 또한 제1, 제2파일럿 분사 시기가 진각됨에 따라 최대 압력 상승률 수준이 향상되는 경향을 보였다.

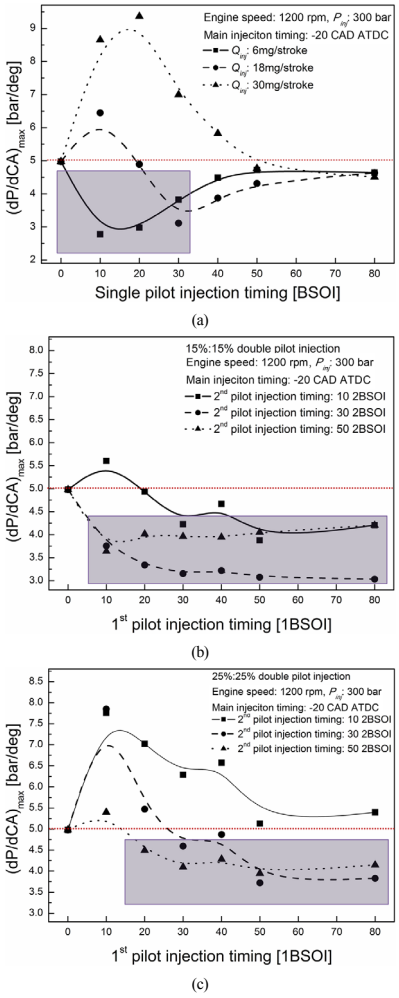


Fig. 4. Max. pressure rise rate with pilot injection strategy (a) single pilot injection (b) 15%:15% double pilot injection (c) 25%:25% double pilot injection [Pinj = 30MPa, main injection timing = -20CAD ATDC]

3.3 연료 소비율 관점

다단 분사 방식 적용 시 연비 경향을 확인하기 위해 도시 연료 소비율을 계산하여 나타내었다. 도시 연료 소비율 (indicated specific fuel consumption; isfc)은 단위 도시 출력 매 시간마다 소비되는 연료의 양을 표시한 값을 나타내며 아래 식과 같이 표현된다.

$$\mathrm{ISFC(g/kW\cdot h)} = \frac{\dot{m}_f\,\mathrm{(g/h)}}{P\mathrm{(kW)}}$$

본 연구에서는 모든 실험 조건에서 총 분사량을 60 mg/stroke로 고정하였기 때문에 연소 과정을 통해 얻은 출력 대표 값인 도시 평균 유효 압력 (indicated mean effective pressure; imep)이 변화함에 따라 연비가 달라진다. 따라서 Fig. 5는 다단 분사 방식에 따른 연비를 보여줌과 동시에 출력 성능을 보여주는 지표라고 할 수 있다. 1단, 2단 파일럿 분사 모든 경우에 단일 분사 대비 연비는 악화되는 경향을 보이고 있다. 이 결과에는 크게 2가지 원인이 있을 수 있다. 파일럿 분사에 의한 연소에 의해 주 분사에 의한 연소가 단일 분사를 했을 경우에 비해 이른 시기에 시작하게 된다. 본 실험에서 적용된 -20 CAD ATDC의 분사시기는 단일 분사시기를 변경하였을 시 최대 출력을 보인 지점이다. 따라서 파일럿 분사에 의해 짧아진 주분사의 점화 지연 기간으로 인해 연소 상이 진각됨에따라 상대적으로 압축 행정 중에 연소가 발생함으로 써 음의 일이 증가하여 출력이 감소하는 것이라고 할 수 있다. 또한 이른 시기에 파일럿 분사가 이루어 졌기 때문에 연소에 참가하는 연료량의 감소로 인한 연소 효율의 악화가 그 원인이라 할 수 있다[3]. 이는 파일럿 분사에 적용된 연료량이 증가하고, 분사 시기가 진각됨에 따라 ISFC가 악화되는 경향을 통해 확인할 수 있다. 다만, 몇 조건을 제외하고는 모든 조건에서 단일 분사에 비해 연비가 악화되었기 때문에 본 연구에서는 단일 분사 기준 2%의 마진을 두었으며 회색 사각형에 그 안에 들어오는 값을 표기하였다.

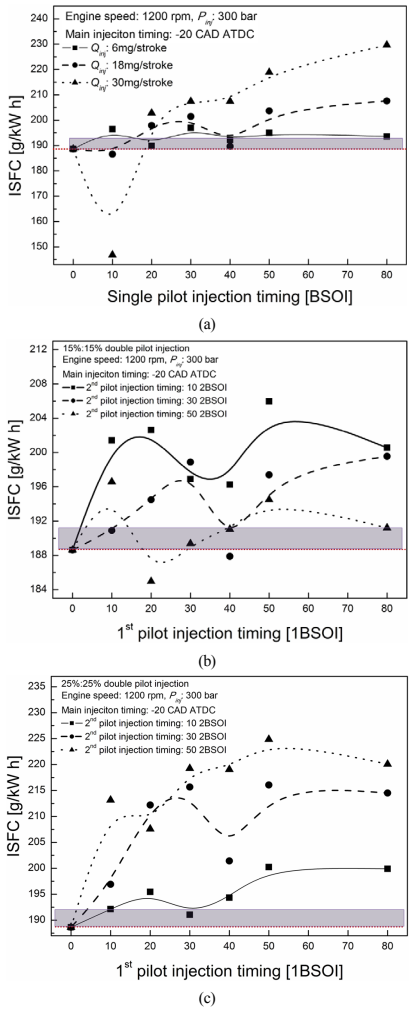


Fig. 5. ISFC with pilot injection strategy (a) single pilot injection (b) 15%:15% double pilot injection (c) 25%:25% double pilot injection [Pinj = 30MPa, main injection timing = -20CAD ATDC]

3.4 최적 분사 전략 도출

Fig. 6에 본 실험에 적용된 모든 조건에 대해 구한 ISFC와 최대 압력 상승율을 도시하였다. 연소 소음의 경우, 단일 분사에 비해 개선된 실험 영역을 붉은 색으로 나타내었다. 제시된 실험 조건의 50%가 넘는 조건에서 단일 분사에 비해 연소 소음 수준이 향상되는 것을 알 수 있었다. 반면 푸른색으로 표시한 단일 분사 대비 연비 2% 마진 이내에 들어오는 영역은 매우 적은 것을 알 수 있다. 본 연구에 적용된 54개의 실험 조건 중 단지 8조건만이 단일 분사 대비 ISFC와 연소 소음이 개선되었다. 2개의 1단 파일럿 분사 조건과, 6개의 15%:15% 2단 파일럿 분사 조건이 이에 해당하였다. 이에 Fig. 7에 Fig. 6으로 부터 얻은 8가지 조건에 대해 단일 분사 대비 Smoke, NOx, 연비, 연소 소음 각각의 저감율을 도시하였다. Smoke와 연비는 case5가 가장 큰 저감율을 보였으며, NOx는 case7에서 가장 큰 결과를 나타내었다. 연소 소음의 경우에는 case1이 가장 큰 개선 효과를 보였다. Smoke, NOx, 연비, 연소 소음을 모두 고려하였을 때의 최적의 실험 조건을 얻기 위해 단일 분사 대비 개선 정도를 각 인자에 대해 가중치를 부과하여 분석하였다. 현재 상용화되어 있는 모든 디젤 차량에는 매연 저감 장치 (diesel particulate filter; DPF)가 장착되어 있으며, 재생 관련 기술도 안정화되어 있는 것으로 판단하여 Smoke에 대한 가중치는 1로 설정하였다. NOx의 DeNOx 시스템이 적용되고 있으나, DPF 대비 재생 관련 연비 악화 정도가 다소 과한 점을 고려하여 가중치를 2로 하였으며, 실 소비자 입장에서 차량 구매 시 가장 중요하게 여겨지는 소음 및 연비를 각각 가중치 3과 4로 설정하였다. 이들 가중치를 적용하여 구한 8가지 조건 별 연소 성능을 Fig. 8에 나타내었다. 단일 분사의 경우 Smoke, NOx, 연비, 연소 소음 성능을 1로 설정하였을 때 8개의 실험 조건 결과 얻은 성능 개선 정도를 나타내었기 때문에 낮은 수치를 가질수록 향상도가 큰 것을 의미한다. 4가지 요 성능 지표에 대한 노멀라이징을 통한 결과 case5인 15%:15% 2단 파일럿 분사에서 제1파일럿 분사시기가 20 CAD 1BSOI이고 제2파일럿 분사 시기가 50 CAD 2BSOI인 분사 방식이 가장 좋은 성능 개선 결과를 보였다. 이 분사 방식 적용 시, 단일 분사 대비하여 Smoke는 60.4%, NOx는 32.9%, 연비는 1.95%, 최대 압력 상승률은 19.3%의 개선을 이룰 수 있었다.

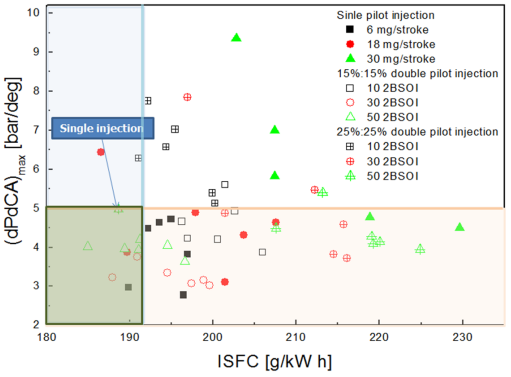


Fig. 6. ISFC and max. pressure rise rate map over all the experimental conditions

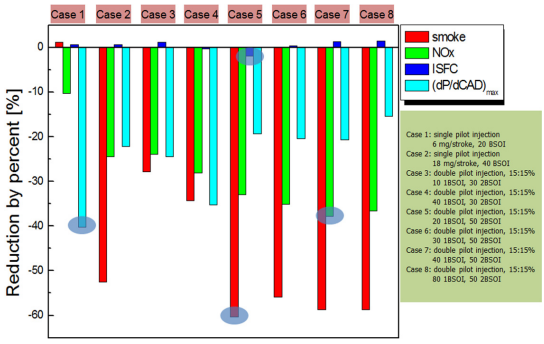


Fig. 7. Reduction by percent for Smoke, NOx, ISFC, max. pressure rise rate with multiple injection strategy

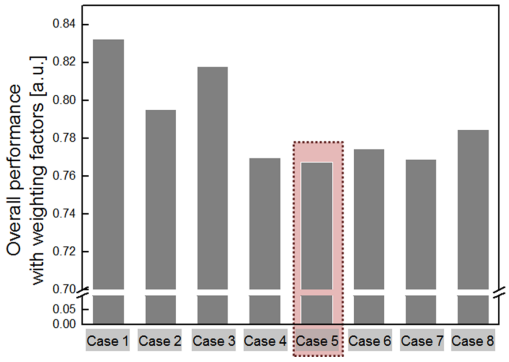


Fig. 8. Overall performance with weighting factors with multiple injection strategy

3. 결론

디젤 엔진에서 Smoke, NOx, 최대 압력 상승률, 연료 소비율을 고려한 다단 분사 적용 시의 최적의 분사 전략 도출을 위한 시험을 수행하였으며, 주요 결과는 아래와 같다.

(1) 단일 분사 대비 1, 2단 파일럿 분사전략 적용 시, 파일럿 분사에 적용되는 분사량의 증가, 파일럿 분사 시기의 진각을 통해 Smoke와 NOx를 각각 73%, 84% 까지 저감할 수 있었다.

(2) 15%:15% 2단 파일럿 적용 시, 평가 조건에 관계없이 단일 분사 대비 최대 압력 상승률이 개선되는 것을 확인하였으며, 파일럿 분사 시기가 진각됨에 따라 최대 압력 상승률 수준이 향상되는 경향을 보였다.

(3) 총 분사량을 고정한 조건에서 일부의 연료를 이른 시기에 분사하여, 음의 일의 증가 및 연소 효율 악화로 인해 단일 분사 대비 연료 소비율은 악화되는 경향을 보임

(4) 현 디젤 엔진의 기술 수준을 고려하여 부과한 가중치 반영 시, 다단분사 적용을 통해 단일 분사 대비하여 Smoke는 60.4%, NOx는 32.9%, 연료 소비율은 1.95%, 연소 소음은 19.3%의 개선을 이룰 수 있었다.

(5) 향후, 본 결과를 기반으로 운영영역을 확장하여 최적의 엔진 성능을 확보할 수 있는 분사전략을 도출할 예정이다.

References

[1] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals. p. 491-493, Mcgraw-Hill, 1988.

[2] T. V. Johnson, "Diesel Emission Control in Review", *SAE Paper 2001-01-0184*, 2001.
DOI: https://doi.org/10.4271/2001-01-0184

[3] J. Lee, J. Jeon, J. Park and C. Bae, "Effect of Multiple Injection strategies on Emission and Combustion Characteristics in a Single Cylinder Direct- Injection Optical Engine", *SAE Paper 2009-01-1354*, 2009.
DOI: https://doi.org/10.4271/2009-01-1354

[4] W. Park, E. Kurtz, W. Willems and R. Reitz, "Use of Multiple Injection Strategies to Reduce Emission and Noise in Low Temperatrue Diesel Combustion", *SAE Paper 2015-01-0831*, 2015.
DOI: https://doi.org/10.4271/2015-01-0831

[5] C. Park, S. Kook, and C. Bae, "Effects of Multiple Injections in a HSDI Diesel Engine Equipped with Common-Rail Injection System", *SAE Paper 2004-01-0127*, 2004.
DOI: https://doi.org/10.4271/2004-01-0127

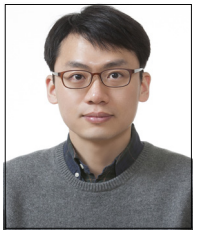
[6] K. Cung, A. Moiz, J. Hohnson, S. Lee, C. Kweon and A. Montanaro, "Spray-Combustion Interaction Mechanism of Multiple-Injection under Diesel Engine Conditions", *Proc. Combust. Inst.* Vol. 35 pp.3061-3068, 2015.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.07.054

[7] X. Li, C. Guan, Y. Luo and Z. Huang, "Effect of Multiple Injection Strategies on Diesel Engine Exhaust particle Size and Nanostructure", *Journal of Aerosol Science*. Vol. 89 pp.69-76, 2015.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.07.008

[8] G. T. Reader, C. E. Bowen and Potter, "Combustion Noise form a Diesel Engine Operating with High Concentrations of Intake Carbon Dioxide." *SAE Technical Paper 1999-01-2713*, 1999
DOI: https://doi.org/10.4271/1999-01-2713

[9] N. Horibe, T. Annen, Y. Miyazaki and T. Ishiyama, "Heat Release Rate and NOx Formation Process in Two-Stage Injection Diesel PCCI Combustion in a Constant-Volume Vessel." *SAE Technical Paper 2010-01-0608*, 2010
DOI: https://doi.org/10.4271/2010-01-0608

이 진 우(Jin-Woo Lee) [정회원]



- 2005년 2월 : KAIST 기계공학부 (공학석사)
- 2011년 8월 : KAIST 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 8월 ~ 2015년 1월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 울산과학대학교 기계공학부 조교수

〈관심분야〉
에너지 시스템, 연소시스템, 친환경 시스템