

Common-Rail DI Diesel Engine에서 Split Injection이 PM 및 NOx 배출에 미치는 영향에 관한 기초 연구

최진호* · 정재욱** · 장동훈* · 이재욱* · 전광민***

A Study of the Effects of Split Injection on PM and NOx emission in a Common-Rail DI Diesel Engine

Jinho Choi*, Jaewook Chung**, Donghoon Chang*, Jaewook Lee*, Kwangmin Chun***

ABSTRACT

The major purpose of this study is to find the optimized split injection quantities and dwell angles for PM reduction without increasing NOx. The tests were performed on a Common-Rail DI Diesel Engine to obtain optimum injection timing and duration. In this study, total injection quantities were divided into the ratio of 25-75%, 50-50% and 75-25%. NOx and PM were measured on the condition of the same bsfc by increasing dwell angles. It was found that the split injection reduced NOx with dwell angle increase. For 50_50, 75_25% split injection cases, PM was reduced with 10 to 12(CAD) dwell angles. For 25_75% split injection 33% PM reduction was achieved with 8 to 12(CAD) dwell angles.

Key Words : NOx(질소 산화물), PM(입자상 물질), Common Rail(커먼레일), Start of injection(분사 시작 시기), Heat Release Rate(열방출율)

기 호 설 명

PM : Particulate Matter
 BMEP : Brake Mean Effective Pressure, bar
 ATDC : After Top Dead Center, °CA(crank angle)
 BTDC : Before Top Dead Center, °CA(crank angle)
 CAD : Crank Angle Degree

1. 서 론

CO2 저감을 통해 지구 온난화 방지를 위한 전 세계적인 노력에 의해 에너지 절약이 주요 관심

사로 대두되고 수송분야의 경우 연비가 좋은 디젤엔진에 대한 관심이 고조되고 있다.

디젤엔진에서 배출되는 오염물질 중 문제가 되는 것은 크게 NOx와 입자상 물질(PM)인데 PM은 각종 폐 질환 및 기관지 질환을 일으키는 것으로 알려져 있고, 각종 화학물질로 인한 질병 발생이 예상되고 있는 실정이다. 따라서 디젤엔진에서 배출되는 PM의 배출량을 구체적으로 분석하는 것이 필요하다.

* 연세대학교 대학원

† 연락저자, jh3210@yonsei.ac.kr

** 건국대학교 대학원

*** 정회원, 연세대학교 기계공학부

Common-Rail type 디젤엔진의 경우 엔진 회전수와 부하에 독립적으로 Injection을 제어할 수 있어 Injection제어를 통한 PM과 NOx의 저감이 가능하게 되었다.

이러한 점을 활용하여 연소실 내에 Split 분사를 하여 NOx와 PM발생을 동시에 저감시키는 연구결과들을 보고하고 있으나 두 injection사이의 Dwell각에 따른 변화와 소형 Common-Rail DI Diesel Engine에서의 실험결과가 미흡한 실정이다.^{1),3),4),5),9)} 이에 따라 본 실험에서는 주요 기관 운전조건에서 split injection의 injection timing, quantity 그리고 두 injection 사이 Dwell에 따른 PM을 포집 하였다. 그리고 Emission을 측정하여 각 조건별로 PM-NOx량의 변화를 분석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험 엔진 제원

본 실험에서 사용한 엔진은 상용 2000cc, CRDI(Common-Rail Direct Injection) 디젤엔진으로 실험 장치 구성에 대한 개요도는 Fig. 1에 그리고 엔진의 기본 제원은 Table 1에 나타내었다.

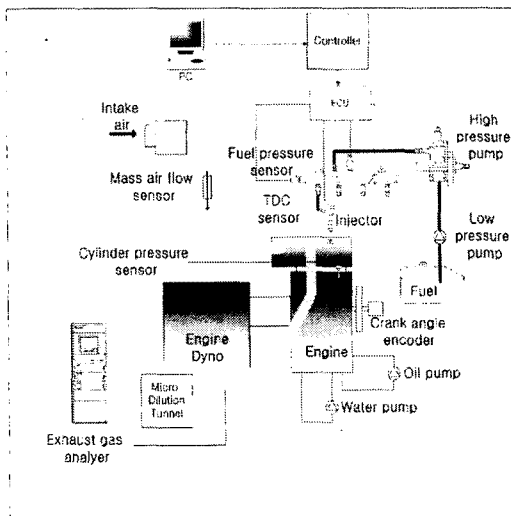


Fig. 1 Experimental setup of common rail DI diesel engine

Table 1 Specifications of test engine

Model	D20 TCI
Combustion System	Direct Injection
Induction Type	Turbo Charger
Fuel Injection	Common Rail
Displacement Volume	1991cc
Stroke×Bore (mm)	92×83
Compression Ratio	17.7 : 1
IVO, IVC	BTDC 7°, ABDC 43°
EVO, EVC	BBDC 52°, ATDC 6°
Maximum Torque	259Nm at 2000rpm
Maximum Power	85kW at 4000rpm

2.2 실험 장치 구성

Fig. 1에서 보여진 바와 같이 엔진의 캠 축에 장치되어 있는 엔코더의 신호를 이용 분사 시기를 제어하였고 엔진으로부터 배출되는 가스의 분석을 위해서 HORIBA사의 MEXA-1500DEGR을 사용하였다.

Table 2 Specifications of Dilution Tunnel

Model	Micro Dilution Tunnel System(MDT)
Range	Diesel engine
Sampling Time	2-5min
Dilution mass	200SLPM
Total mass	200SLPM
Sampling Flow Accuracy	±1%FS
Weight	About 350kg
Scale	650W×850D×1800H
Hose length	8m
Filter Diameter	Φ 70

PM 포집은 현민기술연구소에서 제작한 dilution tunnel HM-8178을 이용하여 포집 하였다. PM 포집은 4분간 실시하였으며 PM이 포집된 필터는 온도 $22 \pm 3^{\circ}\text{C}$, 습도 $45 \pm 8\%$ 가 유지되는 weighing chamber에서 2~36시간 항온항습시킨 뒤 무게를 측정하였다. 참고로 본 실험에서 사용된 여지는 Gelman Sciences사의 TX40HI20- WW이고 포집효율은 96~99%정도이다.

2.3 실험 범위

Table 3 실험 조건

엔진 속도	1500rpm
엔진 부하	BMEP 6bar
연료 분사 시기	BTDC 5[CAD]
Split Injection Type	75_25, 50_50, 25_75

Table 3은 실험 조건을 나타낸 것이다. 엔진 속도는 Split Injection을 했을 때 가장 연소가 안정적이며 PM저감 효과가 컸던 1500rpm이 선정되었고, 각 실험조건에서 bsfc를 고정하였으며 첫분사 시기는 BTDC 5[CAD]로 고정하였다. 한편 각 Split Injection조건에서 두 Injection사이의 Dwell각을 늘려가며 시험을 진행하였다.

Table 4 Example of Split injection case

Case	1st injection[%]	Dwell[CAD]	2nd injection[%]
25_1_75	25	1	75
50_1_50	50	1	50
75_1_25	75	1	25

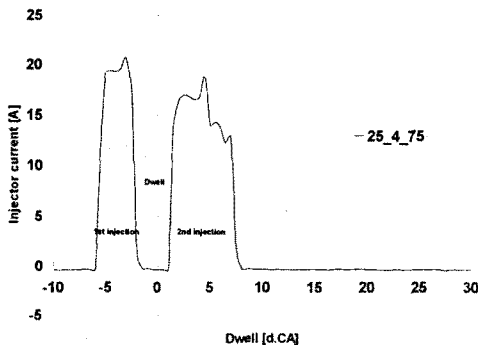


Fig. 2 Example of Split injection

Fig. 2, Table 4는 Split injection에 대한 예를 나타낸 것이다. 예를 들어 75_1_25인 경우 1st injection양이 Total injection양의 75%이고 Dwell각이 1[CAD]이며 2nd injection양이 Total injection양의 25%를 말한다.

참고로 여기서 말하는 Dwell각은 Controller 입력값을 기준으로 한다.

3. 실험결과

3.1 25_75 Injection Proportions일 때 Injection Dwell에 따른 NOx/PM

Fig. 3은 1500rpm BMEP 6bar에서 25_75 injection proportions일 때 Injection Dwell에 따른 NOx/PM을 나타낸 것이다.

Fig. 3에서 NOx는 Dwell이 증가함에 따라 감소됨을 알 수 있다. PM은 5[CAD]까지 증가하다가 6[CAD]부터 감소하여 8~12[CAD]는 single보다 적은 PM을 배출하는 것을 알 수 있다.

Dwell이 커질수록 연소 온도가 떨어져서 NOx가 감소되고 PM은 증가됨을 확인할 수 있다. 그러나 Dwell 8~12[CAD]에서는 후연소가 일어나면서 PM저감 효과를 얻어 PM감소를 확인할 수 있다.^{2),7)} 이러한 영향은 Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 연소 압력 변화 선도와 열 방출률 선도를 통해 확인할 수 있다.

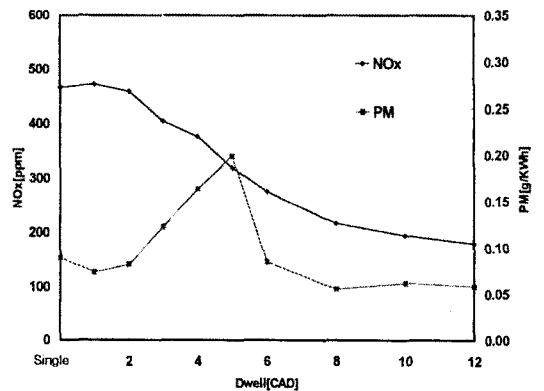


Fig. 3 PM & NOx emissions as a function of Split injection dwell angle at 25_75 Injection Proportions

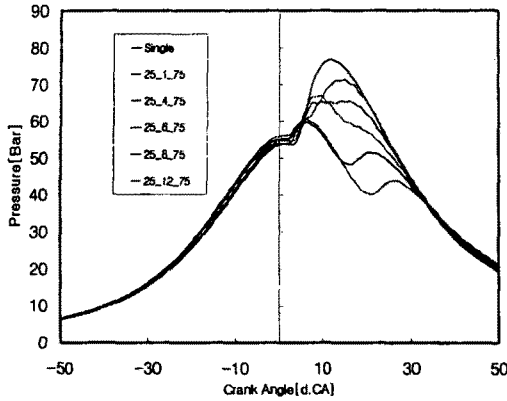


Fig. 4 Cylinder Pressure as a function of Split injection dwell angle at 25_75 Injection Proportions

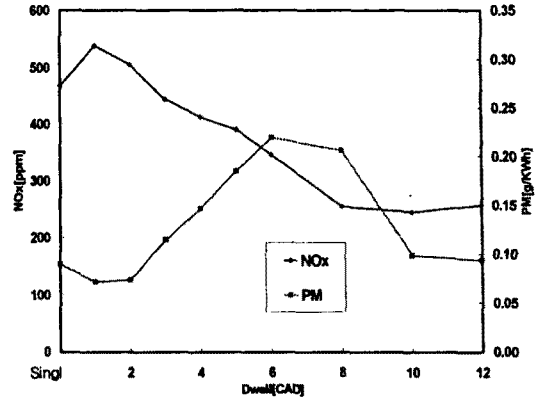


Fig. 6 PM & NOx emissions as a function of Split injection dwell angle at 50_50 Injection Proportions

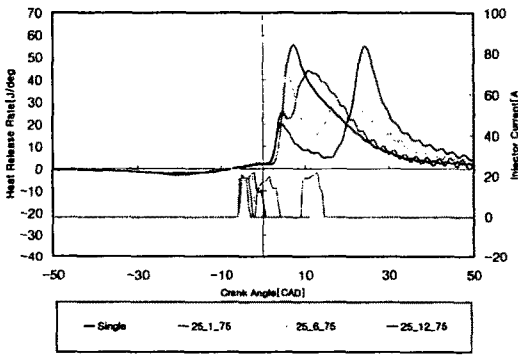


Fig. 5 Heat Release Rate & Injector Current as a function of Split injection dwell angle at 25_75 Injection Proportions

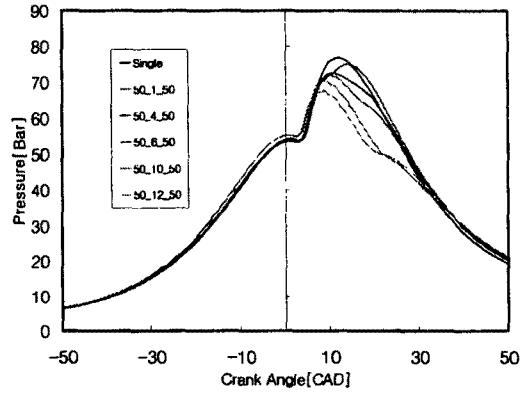


Fig. 7 Cylinder Pressure as a function of Split injection dwell angle at 50_50 Injection Proportions

3.2 50_50 Injection Proportions일 때 Injection Dwell에 따른 NOx/PM

Fig. 6은 1500rpm BMEP 6bar에서 50_50 injection proportions일 때 Injection Dwell에 따른 NOx/PM을 나타낸 것이다.

25_75 injection proportions일 때와 마찬가지로 Dwell이 증가함에 따라 NOx는 감소함을 알 수 있다. PM 또한 6[CAD]까지 증가하다가 감소하여 10~12[CAD]에서는 single과 거의 유사한 PM을 배출하는 것을 알 수 있다.

이러한 영향은 25_75 injection proportions일 때와 마찬가지로 Fig. 7과 Fig. 8에서 확인할 수 있다.

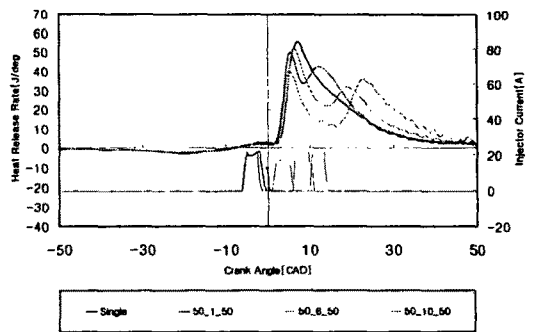


Fig. 8 Heat Release Rate & Injector Current as a function of Split injection dwell angle at 50_50 Injection Proportions

3.3 75_25 Injection Proportions일 때 Injection Dwell에 따른 NOx/PM

Fig. 9는 1500rpm BMEP 6bar에서 75_25 injection proportions일 때 Injection Dwell에 따른 NOx/PM을 나타낸 것으로 25_75, 50_50 injection proportions 일때와 마찬가지로 Dwell이 증가함에 따라 NOx가 감소함을 알 수 있다.

PM 또한 위에서의 마찬가지로 8[CAD]까지 증가하다가 10~12[CAD]에서 감소하는데 25_75, 50_50 injection proportions때보단 감소효과가 덜함을 알 수 있다.

부가적으로 Fig. 5, 8, 11에서 나타낸 injector current를 보면 injector charging time에 의한 Injector Current Delay가 있음을 확인할 수 있다.

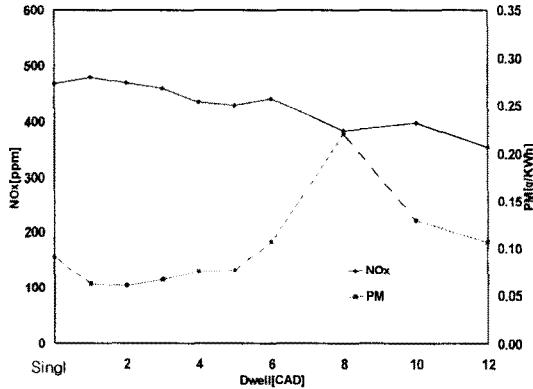


Fig. 9 PM & NOx emissions as a function of Split injection dwell angle at 75_25 Injection Proportions

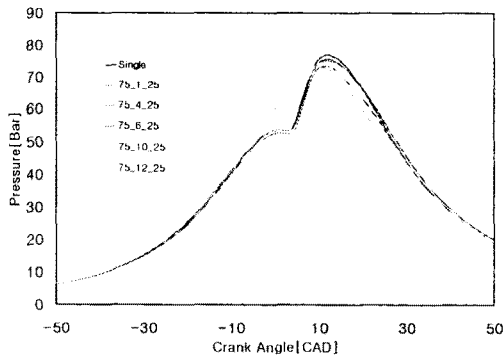


Fig. 10 Cylinder Pressure as a function of Split injection dwell angle at 75_25 injection proportions

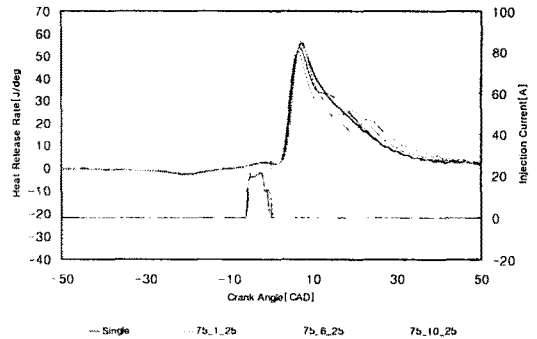


Fig. 11 Heat Release Rate & Injector Current as a function of Split injection dwell angle at 75_25 Injection Proportions

4. 결론

Common-rail DI Diesel Engine에서 Split injection 25_75, 50_50 그리고 75_25조건인 두 Injection 사이 Dwell각을 늘려가며 PM 및 NOx 배출량을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 1500rpm BMEP 6bar에서 동일한 bsfc일 때 두 injection의 Dwell이 증가하면 연소온도가 떨어짐에 따라 NOx가 감소함을 알 수 있다.
- 2) Split injection 50_50조건과 75_25조건에서 Dwell각이 10~12(CAD)일 때 후연소가 일어나면서 PM저감 효과를 얻어 PM이 감소함을 확인했다.
- 3) Split injection 25_75조건에서 가장 PM저감 효율이 높았으며 Single injection대비 약 33% 저감됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) Nehmer, D. A. and Reitz, R. D., Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and NOx Emissions , SAE Paper 940668, 1994.
- 2) John B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals , McGraw-Hill Book Company, pp.503-514, 1988.
- 3) Zhiyu Han, Ali Uludogan, Gregory J. Hampson, and Rolf D. Reitz., Mechanism of Soot and NOx Emission Reduction Using Multiple-injection in a Diesel Engine , SAE Paper 960633, 1996.
- 4) Jianwen Li, Jae Ou Chae and S. M. Lee, J. S. Jeong, Modeling the Effects of Split Injection Scheme on Soot and NO Emissions of Direct Injection Diesel Engines by a Phenomenological Combustion Model , SAE Paper 962062.
- 5) D. T. Montgomery and R. D. Reitz, Effects of Multiple Injections and Flexible Control of Boost and EGR on Emissions and Fuel Consumption of a Heavy-Duty Diesel Engine , SAE Paper 2001-01-0195.
- 6) F. Mallamo, M. Badami and F. Millo, Analysis of Multiple Injection Strategies for the Reduction of Emissions, Noise and BSFC of a DI CR Small Displacement Non-Road Diesel Engine , SAE Paper 2002-01-2672
- 7) Francisco Payri, Jesús Benajes, Jose V. Pastor and Santiago Molina, Influence of the Post-Injection Pattern on Performance, Soot and NOx Emissions in a HD Diesel Engine , SAE Paper 2002-01-0502, 2002.
- 8) M. Badami, F. Mallamo, F. Millo and E. E. Rossi, Influence of Multiple Injection Strategies on Emissions, Combustion Noise and BSFC of a DI Common Rail Diesel Engine , SAE Paper 2002-01-0503, 2002.
- 9) Taewon Lee and Rolf D. Reitz, The Effect of Split Injection and Swirl on a HSDI Diesel Engine Equipped with a Common Rail Injection System , SAE Paper 2003-01-0349, 2003.
- 10) 노승민, 직접분사식 디젤엔진에서 배기재순환율과 온도가 NOx와 PM저감에 미치는 영향에 관한 실험적 연구 , 연세대학교, 2001.