

# 이단 후분사의 적용을 통한 디젤 PCCI 연소의 HC 저감에 관한 연구

박영수\* · 배충식\*

## The study about the reduction of HC in diesel PCCI combustion by double post injections

Youngsoo Park\*, Choongsik Bae\*

### ABSTRACT

Effect of double post injections on diesel PCCI combustion with focus on HC emission was investigated in a single-cylinder direct-injection diesel engine. The ISFC, HC and CO emissions were reduced by single or double post injections. The application of double post injections could also improve the trade-off relationship between NOx and HC emissions under wide EGR rate range.

**Key Words** : Diesel PCCI combustion, Post injection, Exhaust gas recirculation

디젤 엔진은 가솔린 엔진 대비 열효율이 높아 향후 시행될 이산화탄소 (CO<sub>2</sub> : Carbon dioxide) 배출 규제 대응에 유리한 것으로 알려져 있다 [1]. 하지만 배기 규제 대상인 질소 산화물(NOx : Nitric oxides)과 입자상 물질(PM : Particulate matter) 배출량이 문제가 되고 있으며 향후 2014년 시행될 EURO-6 규제 대응을 위해서는 NOx의 경우 현 수준의 절반 이상을 줄여야 하는 상황이다. 이를 해결하기 위해 NOx와 PM을 동시에 저감할 수 있는 신연소 기술이 소개되었으며 디젤 PCCI (Premixed charge compression ignition) 연소도 그중 하나이다. 디젤 PCCI 연소의 구현은 주로 기존 디젤 연소 대비 진각된 분사 시기와 배기 가스 재순환 (EGR : Exhaust gas recirculation)의 적용을 통해 이루어진다 [2]. 이러한 방식을 적용할 경우 실린더 내 혼합기가 착화되기 전 공기와 연료가 예혼합 됨으로써 국부적으로 농후한 혼합기 혹은 이른 공연비에 가까운 영역이 줄어들고 최고 연소 온도가 낮아짐으로써 NOx와 PM의 생성이 억제된다 [3]. 이러한 낮은 NOx와 PM 배출의 장점과는 반대로 이른 분사로 인한 연료의 벽면 적실 현상 및 낮은 연소 온도로 인해 불완전 연소 생성물인 탄화수소 (HC : Hydrocarbon)와 일산화탄소 (CO : Carbon mo-

noxide) 배출량은 증가하는 문제점이 나타나게 되며 이는 디젤 PCCI 연소의 주요 해결 과제 중 하나이다 [4]. 본 연구에서는 디젤 PCCI 연소의 문제점인 HC와 CO 배출량을 저감하기 위해 주분사 이후에 분사되는 후분사를 적용하였으며, 또한 후분사를 2회로 나누어 적용했을 시 HC 배출 특성에 미치는 영향에 대해 파악해 보았다.

연구에 사용된 엔진은 승용 디젤 엔진의 헤드를 이용하여 제작된 500 cc급 단기통 디젤 엔진으로 상세 제원은 Table 1에 나타내었다. 엔진의 운전 속도는 동력계에 의해 제어되었으며 별도의 연료 분사 시스템을 이용하여 분사량, 분사압, 분사 시기 및 횟수를 제어하였다. Table 2는 실험 조건을 나타내고 있다. 엔진의 운전 속도 및 전체 연료량은 저속, 저부하 조건인 1200 rpm, 12 mg/cycle로 고정하였으며 주분사 시기는 28 crank angle before top dead center (CAD BTDC)로 고정하였다. 55 MPa의 분사압을 적용하였으며 일단 후분사 적용 시에는 전체 연료량의 10, 20, 30%를, 이단 후분사 적용 시에는 전체 분사량의 20, 30%인 2.4, 3.6 mg을 동일한 양으로 나누어 적용하였다. 후분사 시기에 대한 정의는 Fig 1과 같다. 배기 중 CO<sub>2</sub> 농도에 대한 흡기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 비율로 정의한 EGR율은 전체 실험 조건에 대해 0 ~ 60%를 적용해 주었으며 냉각수 온도, 흡기 온도, 연료 온도는 각각 80, 27, 40 °C로 일정하게 유지해 주었다.

\* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락처, csbae@kaist.ac.kr

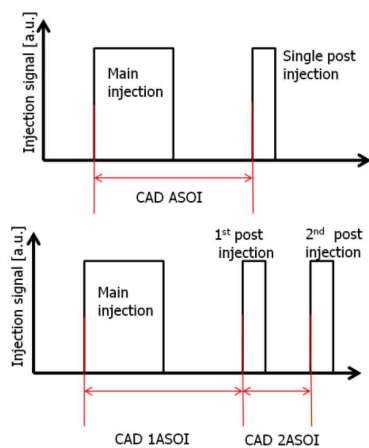
TEL : (042)350-3063 FAX : (042)-350-8025

**Table 1** Engine specification

Engine type	Single-cylinder, common-rail diesel engine
Bore x Stroke [mm]	84 x 90
Displacement [cc]	498
Compression ratio	16
Injector type	Piezo-actuated

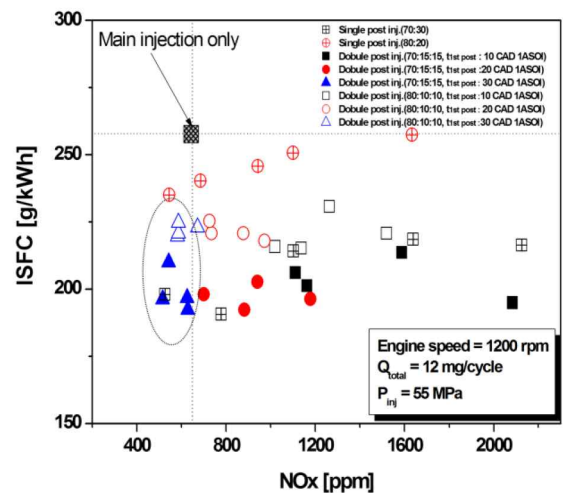
**Table 2** Experimental conditions

Engine speed [rpm]	1200
Total injection quantity [mg/cycle]	12
Main injection timing [CAD BTDC]	28
Injection pressure [MPa]	55
Single post injection quantity [mg/cycle]	1.2, 2.4, 3.6
Single post injection timing [CAD ASOI]	10, 15, 20, 30, 40
Double post injection quantity [mg/cycle]	1.2 / 1.8
<i>1<sup>st</sup> post</i> / <i>2<sup>nd</sup> post</i>	
Double post injection timing <i>1<sup>st</sup> post</i> [CAD1ASOI]/ <i>2<sup>nd</sup> post</i> [CAD2ASOI]	10, 20, 30 / 5, 10, 20, 30
EGR rate [%]	0 ~ 60
Coolant temperature [°C]	80
Intake air temperature [°C]	27
Diesel fuel temperature [°C]	40



**Fig. 1** The definition of post injection timing

Fig 2와 3은 주분사 만을 적용했을 경우 대비 일단/이단 후분사 적용 시의 도시 연료 소모율 (Indicated specific fuel consumption : ISFC)과 NOx, HC, CO 배출 특성을 나타내고 있다. ISFC의 경우 후분사를 적용함에 따라 주분사량 감소로 인한 음의 일 감소 및 후분사에 의한 팽창 일 증가로 인해 단일 분사 대비 낮은 값이 나타난 것을 볼 수 있다. NOx 배출량의 경우 대부분의 후분사 적용 조건에서 단일 분사 적용 시보다 많은 양이 배출되었는데 이는 후분사 된 연료가 고온/고압 환경에서 연소되는 과정에서 생성된 후 배출된 것으로 판단된다. 하지만 후분사 시기가 압축 상사점 이후로 지각된 경우에는 단일 분사와 비슷하거나 더 낮은 NOx 배출량을 나타내었다. HC와 CO 배출량은 모든 후분사 적용 조건에서 단일 분사 대비 낮은 값을 나타내었다. 이는 주분사에 의한 주연소 과정에서 발생한 HC와 CO가 후연소에 의해 산화가 촉진되었기 때문이다. 또한 이단 후분사가 적용될 경우 HC 감소 폭이 더 큰 것을 볼 수 있는데 이는 동일한 양의 연료를 2회에 나누어 분사함에 따라 분무 침투길이 줄어들게 되면서 연료의 벽면 적심 현상이 줄어들었기 때문으로 판단된다 [5][6]. 이로 인해 후연소에 참여하는 연료량 증가로 후연소가 더 활발해지면서 HC가 일단 후분사 대비 더 감소한 것으로 보인다. Fig 4는 이단 후분사 적용에 따른 연소 압력 및 열방출율을 나타내고 있다. 이단 후분사 적용에 따른 주분사량 감소로 인해 주분사에 의한 첫 번째 열방출을 피크는 감소하는 것을 볼 수 있으며 2회의 후분사로 인한 두 번째, 세 번째 열방출을 피크가 나타나는 것을 관찰할 수 있다.



**Fig. 2** ISFC and NOx emissions with single and double post injections (no EGR)

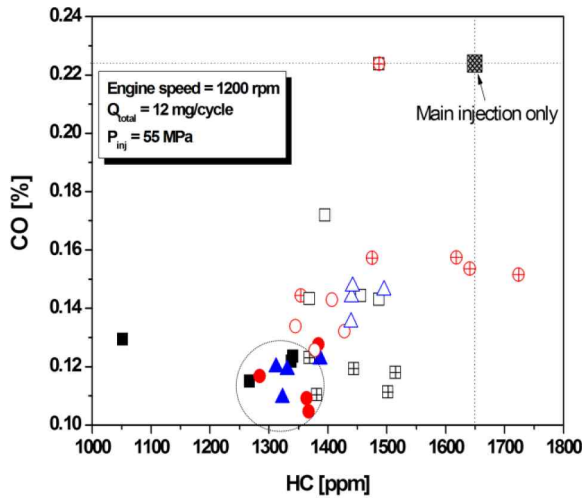


Fig. 3 HC and CO emissions with single and double post injections (no EGR)

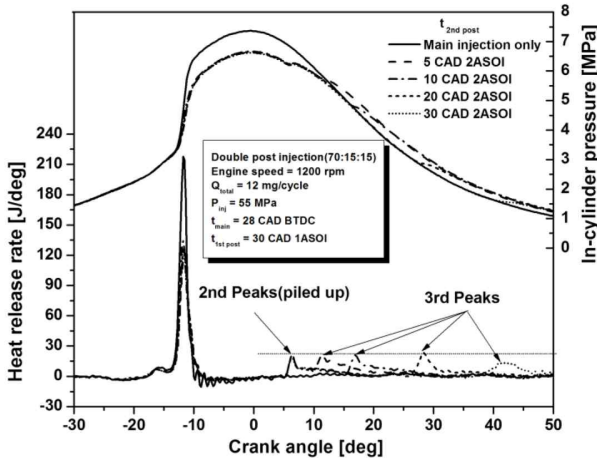


Fig. 4 Combustion characteristics with double post injections (no EGR)

EGR 적용에 따른 NOx와 HC 간의 상반관계를 Fig 5에 나타내었다. EGR율이 증가함에 따라 NOx 배출량은 줄어들고 HC 배출량은 늘어나는 경향이 나타나는데 일단 후분사 적용 시 동일 NOx 배출량 기준에서 단일 분사 대비 더 낮은 HC 배출량을 나타내는 것을 볼 수 있다. 또한 대부분의 영역에서 일단 후분사를 적용할 경우 일단 후분사 대비 NOx와 HC 간의 상반관계 개선에 더 효과적인 것을 볼 수 있다.

본 연구를 통해 디젤 PCCI 연소의 문제점인 높은 HC 및 CO 배출량 저감에 후분사가 효과적인 것을 알 수 있었으며 EGR 적용 조건하에서 일단 후분사 적용 시 NOx/HC 상반관계 개선에 더 유리한 것을 알 수 있었다.

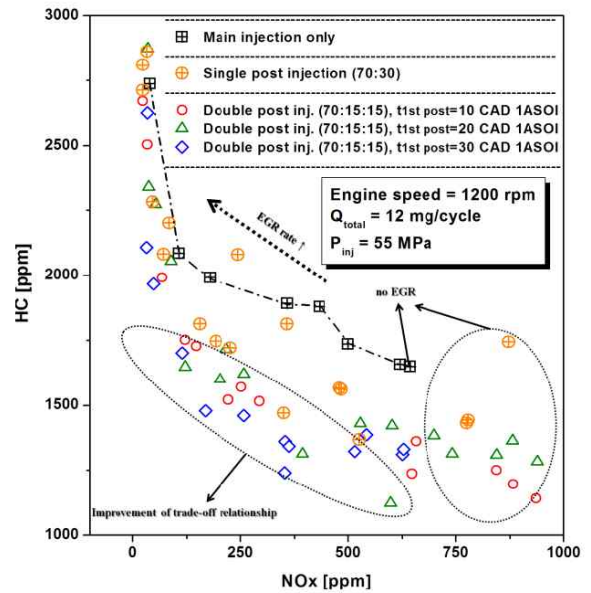


Fig. 5 NOx and HC emissions with EGR and post injection

## 후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업의 일환(10039673)으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] L. Zhang, "A Study of Pilot Injection in a DI Diesel Engine", SAE Technical Paper 1999-01-3493, 1999.
- [2] M. Lewander, K. Ekholm, B. Johansson, P. Tunestai, N. Milovanovic, N. Keeler, T. Harcombe and P. Bergstrand, "Investigation of the Combustion Characteristics with Focus on Partially Premixed Combustion in a Heavy Duty Engine", SAE Technical Paper 2008-01-1658, 2008.
- [3] B. Keeler, "Constraints on the Operation of a DI Diesel Engine in Partially-premixed Combustion Mode", Ph. D. Thesis, The University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom, 2009.
- [4] D. Kim, I. Ekoto, W. Colban and P. Miles, "In-cylinder CO and UHC Imaging in a Light-Duty Diesel Engine during PCCI Low-Temperature Combustion", SAE Technical Paper 2008-01-1602, 2008.
- [5] 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 Technical Paper 2009-01-1354, 2009.

[6] G. Lequien, O. Andersson, B. Johansson, R. Wellander, J. Rosell, M. Richter and M. Alden, "Liquid Spray Penetration Length during Late Post Injection in an Optical Light-Duty Diesel Engine", The Eighth International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA 2012), July, 2012.