

## 디젤엔진의 부분 예혼합 연소 및 배기 특성에 대한 분사전략의 영향

김재웅·김영진·박상기·이기형\*

한양대학교 기계공학과

### Effects of Injection Strategies on the Partial Premixed Charge Combustion and Emission Characteristics in a Diesel Engine

Jaewoong Kim · Yungjin Kim · Sangki Park · Kihyung Lee\*

Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea  
(Received 3 August 2012 / Revised 4 November 2012 / Accepted 14 January 2013)

**Abstract** : Recently, PCCI (premixed charge compression ignition) combustion is studied to reduce both NO<sub>x</sub> and PM because of homogeneous mixture formation and lower combustion temperature. It has also merit of increasing thermal efficiency owing to better air-fuel mixture. However, it is well known that PCCI combustion has a weakness in fuel economy because PCCI combustion tends to start before TDC. Therefore, it is necessary to find an optimal conditions for PCCI combustion which maintains reduction of NO<sub>x</sub>, PM and increase of thermal efficiency. In this study, pPCCI combustion was realized by adding early injection strategy to a conventional diesel engine. In addition, the characteristics of pPCCI combustion was analyzed by comparing conventional diesel injection strategy. The results show that NO<sub>x</sub> and PM per power in pPCCI combustion were reduced compared to a conventional diesel combustion.

**Key words** : pPCCI(부분 예혼합 압축착화), Pilot injection(파일럿 분사), Early injection(조기 분사), Common-rail diesel engine(커먼레일 디젤 엔진)

#### 1. 서론

최근 자동차용 엔진에는 연비 및 CO<sub>2</sub> 규제에 대응하기 위한 연료소비율 개선 기술과 강화된 배기 규제를 만족하기 위한 배기 배출물 저감 기술이 요구되는 실정이다.<sup>1)</sup> 이를 해결하기 위하여 배기 배출물을 저감시킬 수 있는 기술인 PCCI 연소가 주목을 받고 있다. 일반적으로 PCCI 연소는 연소실 내에 연료를 압축초기에 분사하여 공기와 연료의 혼합이 충분히 형성되어 질 수 있는 여건을 만들어준 후 압축열에 의한 연료공기 혼합기의 자착화를 이용하는 것이다.<sup>2,3)</sup> 기존 디젤 연소에 비해서 균일한 혼합기의 연소와 전체적으로 낮은 연소온도로 인해 배기

배출물의 주범인 PM과 NO<sub>x</sub>를 동시에 저감하며, 열 효율 또한 향상되는 효과를 나타낸다. 그러나 PCCI 연소의 경우, 압축행정 중에 혼합기의 자착화가 진행되어 연소가 TDC 이전부터 이루어져 결국 연비가 악화되는 경향을 나타내는 문제점을 가지고 있다. 이에 대한 대응책으로 PCCI의 장점인 NO<sub>x</sub>와 PM의 저감은 유지하면서 열효율의 저하를 방지하고자 총 분사량의 일부만을 미리 분사하여 혼합기를 생성하고 피스톤 압축한 후 나머지 연료를 분사하는 부분 예혼합 연소(Partial PCCI)를 본 연구에 적용하였다.<sup>4)</sup> 본 연구에서는 상용 디젤엔진에 pPCCI 연소를 구현하기 위해 Early 분사를 추가하는 형태의 분사전략을 사용하여 그에 따른 엔진의 연소 및 배기특성을 분석하였다.

\*Corresponding author, E-mail: hylee@hanyang.ac.kr

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 실험엔진은 Table 1과 같이 EURO-5 기준을 만족하는 최고 분사압이 1800bar인 Piezo type Common rail system을 적용한 배기량 2199cc의 엔진을 이용하여 실험을 수행하였다.

Fig. 1은 엔진실험을 위한 성능 측정 장치 구성도이다. 엔진 동력계는 최대출력이 180kW인 Maiden사의 EC동력계를 사용하여 실험을 수행하였다. 연소실 압력과 엔진 회전수를 취득하기 위하여 엔진에 Kistler사의 Encoder는 크랭크축에 설치하고 압력 센서는 실린더에 설치하였다. 압력 센서는 A/D보드를 통하여 압력으로 변환 후 측정이 되었다. 배기가스 측정은 Horiba사의 MEXA7100DEGR과 AVL사의 Smokemeter를 배기파이프에 설치하여 NOx, THC와 PM을 각각 취득하였다. 또한 EGR rate와 boost

Table 1 The specifications of test engine

Displacement (cc)	2,199
Bore × Stroke (mm)	84.5 × 96
Max. power (ps/rpm)	200/3,800
Max. torque (kg.m/rpm)	44.5/1,800~2,500
Cylinder arrangement	4 cylinders
Compression ratio	16.0
Turbo system	VGT
Injection type	Piezo CRDI

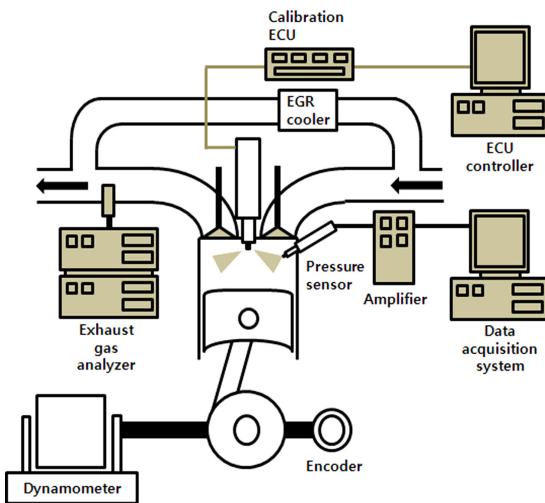


Fig. 1 The schematic of experimental apparatus

pressure, Swirl을 제어하고 인젝터의 분사 횟수, 분사시기, 분사량을 조절하기 위하여 ETAS사의 ES650 장비와 Calibration ECU를 설치하고 INCA 소프트웨어를 통해 각각을 제어를 하였다.

### 2.2 실험 조건

실험조건은 Table 2와 같이 엔진의 오일온도와 냉각수의 온도를 각각 90°C와 80°C인 상태에서 실험을 수행하였다. 1500rpm, 2bar의 조건에서 상용엔진에 설정된 분사량을 측정후, 이 분사량을 기준으로 분사전략에 따른 출력의 변화를 취득하였다. 일정한 조건에서 실험을 하기 위하여 스월비(swirl ratio)와 과급압력(boost pressure) 또한 각각 고정하였고, 배기가스의 변화를 세밀히 관찰하고자 촉매를 제거하고 EGR율을 0%로 고정하여 배기 배출물의 특성을 취득하였다.

실험은 EURO-5 기준을 만족한 상용엔진의 분사전략에 pPCCI 연소를 구현하기 위해 Fig. 2와 같이

Table 2 The experimental conditions

Oil temperature (°C)	90
Cooling temperature (°C)	80
Engine speed (rpm)	1500
Injection pressure (bar)	650
EGR rate (%)	0
Swirl ratio (%)	19
Boost pressure (hpa)	1300
Fuel temperature (°C)	40
Early injection (BTDC deg)	63
Pilot2 injection (BTDC deg)	25.6
Pilot1 injection (BTDC deg)	14.8
Main (Single) injection (BTDC deg)	3.2
Early, Pilot1, Pilot2 quantity (mg/str)	0.8, 0.8, 1.2
Total injection quantity (mg/str)	13

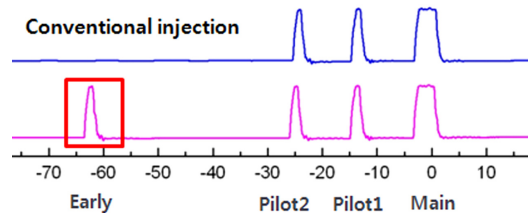


Fig. 2 Diagram of injection timing and definition of each injection

Early 분사를 추가하는 방식을 채택하였다. Early 분사의 분사 시기는 P Carlucci 문헌에 보고된 바<sup>3)</sup>와 같이 예혼합 영역인 BTDC 63°에서 분사하였으며, Pilot1과 Pilot2의 분사 시기는 각각 상용 엔진의 분사시기와 동일하게 BTDC 25.6°와 BTDC 14.8°를 사용하였다. 또한, 분사량은 Early분사는 0.8mg/str, Pilot2 분사는 0.8mg/str, Pilot1분사는 1.2mg/str으로 고정하였고, 총 분사량은 13mg/str로 고정된 상태에서 Early, Pilot1, Pilot2 분사의 유무에 따라 Main 분사량을 변화시키는 조건에서 실험을 수행하였다. 본 실험에서 사용한 각 분사 시기의 명칭을 앞에서 부터 Early, Pilot2, Pilot1, Main 분사로 각각 정의하였다.

### 2.3 실험 절차

실험 절차는 Fig. 3과 같이 처음에는 1단 분사부터 Early 분사를 추가해 가면서 4단 분사까지 분사 횟수에 따른 특성을 파악하였다.

또한 Pilot과 Early 분사에 따른 특성을 알아보기 위하여 2단 분사와 3단 분사에 대한 Pilot과 Early 분사의 효과를 비교해 보았다. 이 그림 중에서 Single injection은 SI로 Double injection은 DI로 Triple injection은 TI로 Quadruple injection은 QI로 각각 명명하였다.

다음은 상용 엔진의 3단 분사조건에 대하여 Pilot 분사의 시기에 따른 영향을 분석하기 위하여 Fig. 4와 같이 Pilot 분사시기를 3가지로 변화시켜 실험을 수행하였다. 상용엔진의 분사 전략을 TI Case.1, 상용 엔진 분사 전략에서 Pilot2 분사를 제거한 것을 TI

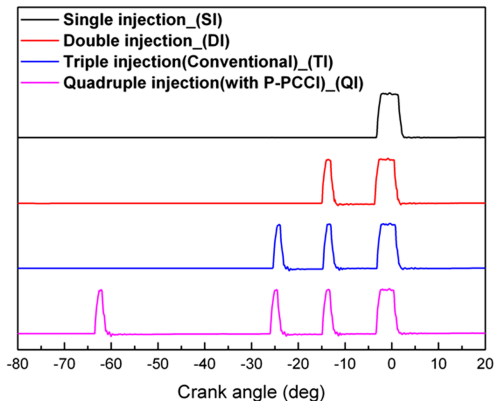


Fig. 3 The graph by a number of injection strategies

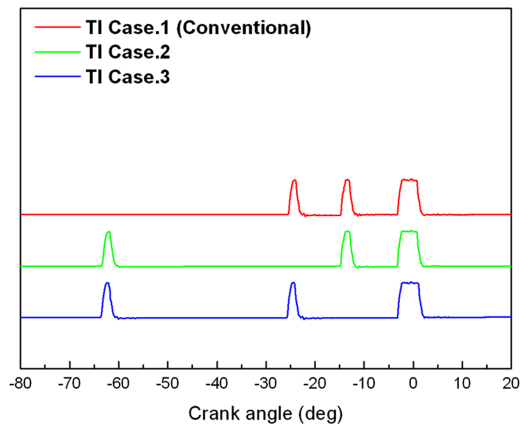


Fig. 4 The graph of injection strategies on triple injection

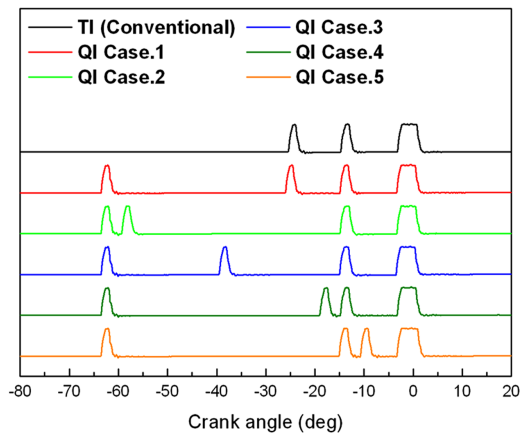


Fig. 5 The graph of injection strategies on quadruple injection

Case.2, Pilot1 분사를 제거한 것을 TI Case.3로 하여 Pilot과 Early 분사의 영향을 평가하기 위한 분사전략으로 선정하였다.

마지막으로 3단 분사조건을 토대로 Pilot2의 분사시기를 Fig. 5와 같이 예혼합 영역부터 Main분사 영역까지 변경하여 그에 따른 연소특성과 배기특성을 분석하였다.

## 3. 실험 결과

주어진 운전영역에서 Pilot 분사 및 Early 분사에 대한 연소 및 배기가스 특성을 살펴보았다.

### 3.1 분사 횟수별 특성

Fig. 6은 각 분사횟수 별 배기특성을 보여주고 있

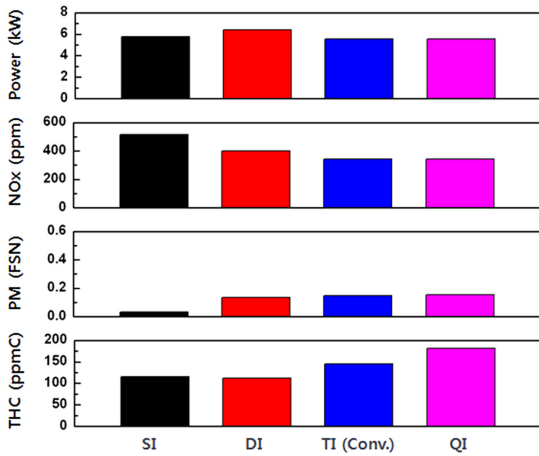


Fig. 6 The effect of emission characteristics by the number of injection strategies

다. 분사횟수가 증가함에 따라 NOx는 DI이후부터 점차 감소하는 경향을 나타내었다.<sup>6,7)</sup> 이는 분사횟수의 증가와 분사시기 진각에 따라서 Pilot 연소가 발생한 후 연소시기가 진각됨에 따라 실린더 내 온도를 증가시켰고, 이후 Main 분사에서 착화 지연 기간(ignition delay)이 단축되어 급격한 열발생을 억제하였기 때문으로 판단되어진다. 반면, PM은 증가하였지만 증가된 양이 미미하였다.<sup>8)</sup> 또한 THC는 증가하였는데 이는 Pilot 분사시기 진각에 따른 낮은 실린더 분위기압에서의 분사로 인하여 벽류의 형성이 증가한 것으로 판단되어진다. 배기특성에서는 NOx가 낮아지고 PM은 거의 유지되는 특성을 나타내었지만, Early를 추가한 QI분사에서 출력이 떨어지는 것을 확인하였기 때문에 출력을 보상하기 위하여 분사횟수는 3단으로 고정하고 Early와 Pilot 분사가 연소와 배기에 미치는 영향을 파악하였다.

### 3.2 3단 분사 시의 특성 비교

Fig. 7은 3단 분사 조건에서 Case 별 배기 특성을 비교한 결과이다. Case.3에서는 NOx와 PM이 모두 감소하고 THC가 상승한 결과를 나타냈다.<sup>9,10)</sup> 이는 Early와 Pilot2의 이른 분사로 인하여 벽류가 증가되어 THC가 증가되었지만, 분사된 연료는 피스톤 압축에 의한 압력상승으로 자발화한 후 Main 연소로 이어져 급격한 열발생이 저하되고 분무 균일도도 증가됨에 따라 NOx와 PM이 동시에 저감되는 것으

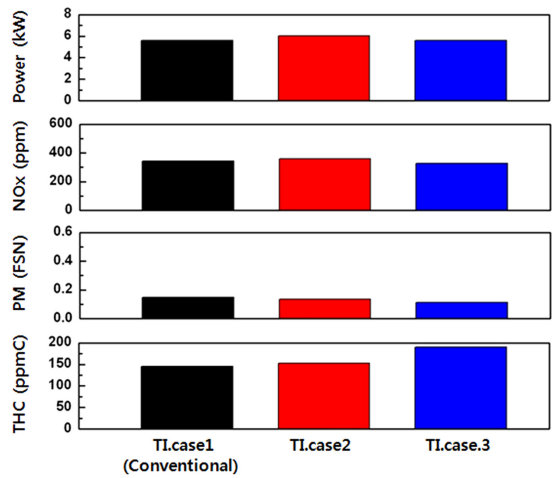


Fig. 7 The effect of injection strategies of triple injection on emission characteristics

로 추측할 수 있다. 그러나 출력에서는 저하되는 것으로 나타났다. Case.2의 경우, PM은 저감되었지만 NOx와 THC가 소폭 증가하는 경향을 나타내었다. 한편, 출력에서는 상승하는 결과를 나타내어 출력당 배기 저감 효과를 분석하기 위하여 Early를 추가한 4단 분사에 대하여 Pilot1과 Early 분사를 고정하고 Pilot2의 분사시기를 변화시키며 출력과 배기의 향상을 모색하였다.

### 3.3 4단 분사 시의 특성 비교

Fig. 8은 Early 분사를 추가한 4단 분사에서 Pilot2의 분사시기를 예혼합 영역부터 Pilot1 분사영역까지 점차로 지각을 시켰을 때의 연소 특성을 나타내었다. Pilot2의 분사시기를 BTDC 30° 이전에 분사하였을 시 피스톤이 압축이 되어도 연소되지 않고 지각이 되다가 Pilot1이 분사되면서 연소되는 경향을 나타내었다. 이후 Pilot2의 분사시기를 BTDC 30° 이후에 분사하였을 시에는 곧바로 연소하고 Pilot1 연소에 영향을 미쳐 완만한 형태의 열발생율이 형성되었다. Pilot2의 분사시기를 Pilot1 분사 이후로 한 Case.5에서는 Main 분사와의 딜레이가 짧아 Pilot2의 연소가 Main 연소에 직접적으로 영향을 미쳐 전체적으로 열발생율이 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 9는 Pilot2 분사시기 변화에 따른 배기 특성을 나타낸 결과 그림이다. Pilot2의 분사시기가 진각 될

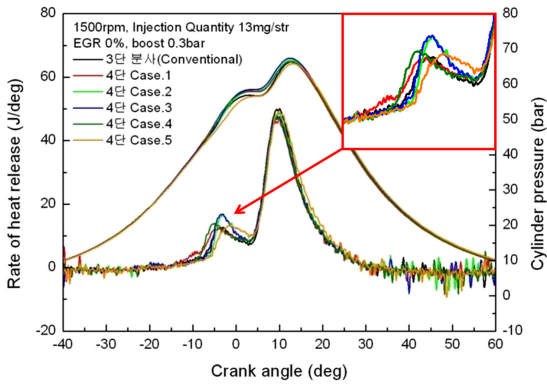


Fig. 8 The effect of injection strategies of quadruple injection on combustion characteristics

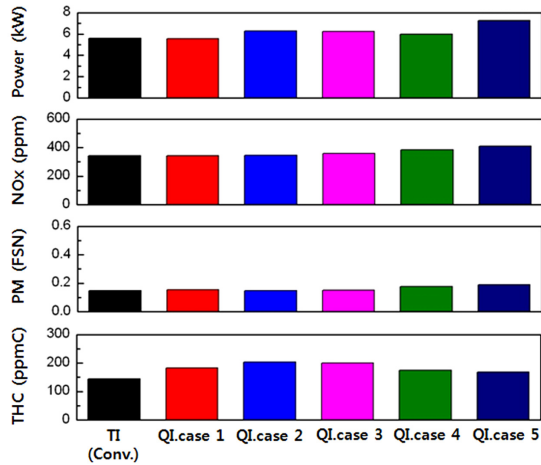


Fig. 9 The effect of injection strategies of quadruple injection on emission characteristics

수록 NOx가 감소되는 경향을 나타내었다. 이는 진각에 따라 초기 열발생율의 기울기가 상승하였지만 피크값의 상승이 높지 않은 예혼합 연소의 형태를 나타내기 때문에 NOx가 줄어든 것으로 판단할 수 있다. PM은 Case.2를 제외하고는 진각 될수록 증가하였지만 증가폭이 미미하였다. THC는 Case.2와 Case.3에서 가장 높았는데 이는 Pilot2의 분사시기 진각에 따라 실린더의 분위기 압력이 낮은 상태에서 분사하여 벽류가 증가한 것으로 판단되어진다. 출력에서는 Case.1을 제외한 모든 Case에서 상용엔진보다 높은 출력을 나타내었다. 그 중 Case.5가 가장 높게 나타났는데 이는 Pilot2의 연소가 Main 연소에 직접적인 영향을 미쳐 출력상승에 기여했다고

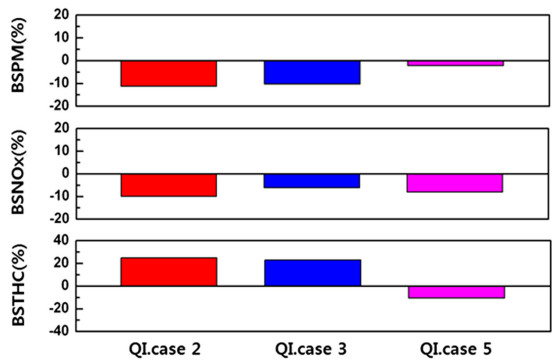


Fig. 10 The effect of injection strategies of quadruple injection on emission per specific power characteristics

판단되었다. Case.5를 제외하고는 전체적으로 Pilot2의 분사시기가 진각이 될수록 점점 출력이 상승하였는데 이는 예혼합 영역으로 갈수록 상승된 것을 나타낸다.

Fig. 10은 TI(Conv.)를 기준으로 출력이 높은 QI.Case.2, QI.Case.3, QI.Case.5의 출력 당 배기 특성을 상대적으로 비교한 그림이다. NOx와 PM 모두 상용엔진에 비해 3~10% 감소한 것을 알 수 있으며, THC는 QI.Case.2와 QI.Case.3에서 20% 정도 증가한 것으로 나타났다. 결과적으로 Early 분사가 추가된 다단분사에서 THC는 증가되지만 출력상승에 따른 동일 출력 대비 NOx와 PM은 저감되는 효과를 최종적으로 얻을 수 있었다.

#### 4. 결론

조기 분사 전략을 커먼레일 디젤엔진에 적용하여 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Pilot 분사의 횟수가 증가할수록 NOx는 감소하고 THC가 증가되는 경향이 나타났다. 이는 분사 횟수 증가에 따른 Pilot 분사량의 증대로 인하여 예혼합 연소에 의한 Main 연소의 착화지연 기간이 줄어들고 급격한 열발생이 억제되어 NOx의 감소를 야기하였고, Pilot 분사시기가 진각됨에 따라 벽류의 증가로 THC가 증가된 것으로 판단되어졌다.
- 2) Pilot이 예혼합영역으로 진각할수록 NOx와 PM이 동시에 저감되는 경향을 나타내었다. 이는 진

각에 따라 혼합시간 증가로 분무균일도의 증가와 자발화 시각의 진각으로 연소실 내 온도를 증가시켜 Main 연소의 급격한 열발생이 저하되어 NOx와 PM이 동시에 저감되는 것으로 판단되어졌다.

- 3) Early 분사가 추가된 4단 분사에서 Pilot2의 분사시기가 예혼합 영역으로 갈수록 NOx가 감소하고 토크가 증가하는 경향이 나타났다. 이는 Pilot2 분사가 진각됨에 따라 예혼합된 혼합기가 Pilot1 분사 시와 같이 연소되면서 출력의 상승을 야기시킨 것으로 판단되어졌다.
- 4) Early 분사가 추가된 4단 분사에서 Pilot을 Main 분사로 지각시켰을 때 출력이 증가하였다. 이는 Pilot2분사와 Main분사와의 딜레이가 짧아 Pilot2의 연소가 Main 연소에 직접적으로 영향을 미쳐 전체적으로 열발생율이 증가하였기 때문이다.
- 5) Early 분사를 적용하였을 때 출력이 증가되었으며, 출력 당 배기특성에서 NOx와 PM이 동시에 저감되는 것을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부와 산업기술평가원에서 지원하는 “Post EURO 6 배기규제 대응을 위한 승용 클린디젤엔진 핵심제어알고리즘 및 ECU 설계기술 개발 (No.10039673)” 과제의 일환으로 수행되었고 지원기관에 감사드립니다.

## References

- 1) J. Y. Heo, J. P. Cha, S. H. Yoon and C. S. Lee, “Effect of Multiple Injection on Combustion and Emission Characteristics in a Single-cylinder Direct Injection Diesel Engine,” KSAE Spring Conference Proceedings, pp.37-42, 2010.
- 2) G. D. Neely and S. Sasaki, “Experimental Investigation of PCCI-DI Combustion on Emissions in a Light-duty Diesel Engine,” SAE 2004-01-0121, 2004.
- 3) D. E. Foster, “Compression-igniter Homogeneous Charge Combustion,” SAE 830264, 1983.
- 4) S. Lee and W. Park, “The Effect of Split Injection Strategy and Piston Bowl Geometry for Partially Homogeneous Charge Combustion Ignition Engine,” KSAE09-B0015, 2009.
- 5) P. Carlucci and A. Ficarella, “Effects on Combustion and Emissions of Early and Pilot Fuel Injections in Diesel Engines,” Int. J. Engine Res., Vol.6, No.1, pp.43-60, 2005.
- 6) S. Mendez, “Using Multiple Injection Strategies in Diesel Combustion : Potential to Improve Emissions, Noise and Fuel Economy Trade-off in Low CR Engines,” SAE 2008-01-1329, 2008.
- 7) B. D. Park, S. I. Kwon, J. G. Oh and S. J. Kim, “Behavior of 2-stage Injection on Diesel Spray,” Journal of ILASS-Korea, Vol.5, No.4, pp.33-39, 2000.
- 8) J. Benajes, R. Novella and S. Arthozoul, “Particle Size Distribution Measurements from Early to Late Injection Timing Low Temperature Combustion in a Heavy Duty Diesel Engine,” SAE 2010-01-1121, 2010.
- 9) C. Park and S. Kook, “Effect of Multiple Injection in a HSDI Diesel Engine Equipped with Common Rail Injection System,” SAE 2004-01-0127, 2004.
- 10) J. Chung, J. Kang, S. Lee, W. Kang and B. S. Kim, “A Study on the Effect of Compression Ratio and EGR on the Partial Premixed Diesel Compressed Ignition Combustion Engine Applied with the Split Injection Method,” Transactions of KSAE, Vol.14, No.5, pp.32-38, 2006.