

직접분사식 디젤 엔진에서 연료 분사 인자에 따른 연소 특성

국 상훈 · 유 준 · 박 철웅, 배 충식

Effects of Fuel Injection Conditions on Combustion Characteristics of a DI Diesel Engine

Sanghoon Kook, Jun Yu, Cheolwoong Park and Choongsik Bae

ABSTRACT

An optical single cylinder diesel engine equipped with a common-rail injection system has been built to investigate diesel combustion and emission characteristics. Three optical windows (piston crown quartz for bottom view of the cylinder, upper piston quartz for allowing laser sheet and liner quartz for side view) have been placed in the optical engine to visualize spray characteristics and combustion process inside the cylinder. Before doing further research using various optical diagnostics with the optical engine, fundamental combustion experiments and flame visualization incorporating a high speed motion analyser have been carried out with a wide range of engine operating conditions.

Key Words : optical engine, common-rail injection system, flame visualization

기 호 설 명

BTDC: Before Top Dead Center

1. 서 론

열효율이 높고 공해 배출물을 저감할 수 있는 고성능 저연비 디젤 엔진 개발의 필요성이 대두됨에 따라 기존의 간접 분사식 디젤 엔진에서는 구현할 수 없었던 연료의 양과 분사 압력, 분사 시기 등을 엔진 회전수 및 부하와는 독립적으로 제어하여 연료를 실린더내에 분사할 수 있는 커먼레일 타입의 직접 분사식 (HSDI, High Speed Direct Injection) 엔진이 개발되고 상용화 되고 있다. 이러한 커먼레일 타입 직접 분사식 디젤

엔진은 고압으로 연료를 실린더 내에 분사 할 수 있고 과일릿트 분사가 가능하여 엔진 소음과 검댕이와 같은 입자상 물질을 기존의 간접 분사식 디젤 엔진에 비해 줄일 수 있고 출력 및 연비를 향상시킬 수 있는 장점이 있다.1,2) 이러한 직접 분사식 디젤 엔진의 개발을 위하여, 실린더 내에서 유동과 연료 분무와의 관계, 연소 과정 그리고 공해 배출물 특히 검댕의 생성 기구를 밝히는 연구가 광학적 접근이 가능하도록 설계된 연구용 가시화 엔진을 이용하여 현재 활발하게 진행되고 있다 3-5). 본 연구에서는 커먼레일 분사 시스템을 장착한 직접 분사식 단기통 디젤가시화 엔진을 이용한 실린더 내에서의 연료 분무, 유동 가시화 및 연소 기구 그리고 검댕이와 같은 유해 배기물의 생성 기구를 밝히는 첫번째 단계로서 가시화 엔진의 운전 조건에 따른 기초 연

* 한국 과학기술원 기계공학과

소 특성 확인과 화염 가시화를 목적으로 하였다.

2. 가시화 엔진 및 실험 장치

2.1 가시화 엔진

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 단기통 디젤 가시화 엔진의 개략도이고, Table 1에는 상세 제원을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 가시화 엔진에는 피스톤 상부에 레이저 슈트를 입사시킬 수 있는 피스톤 상부 가시화 창 (석영, 두께 5 mm), 실린더 측면에서 연소 현상을 관찰할 수 있는 측면 가시화창 (석영, 높이 40 mm)을 장착하였다. 또한 피스톤 하부로부터 피스톤 크라운을 통하여 실린더 안쪽을 관찰할 수 있도록 기존의 피스톤 대신에 기존의 피스톤 길이를 확장한 확장 피스톤을 장착하고 확장 피스톤의 하부 중앙에 45° 거울을 통하여 실린더 안쪽을 관찰할 수 있는 피스톤 후방 가시화 창 (석영, 유효 관찰 면적비 31.4%)을 장착하였다. 이를 이용해 실린더 내의 흡기 및 배기 밸브의 일부분과 실린더 중앙에 수직 방향으로 장착되어 있는 분사기로부터의 분무 형상 및 화염 발달의 관찰이 가능하다.

Table 1. 가시화 엔진 제원

항 목	제 원
엔진 형식	단기통 직접 분사식
Bore X Stroke	83 X 92
배기량	498 cc
압축비	18.3
분사기	5공 sac 타입

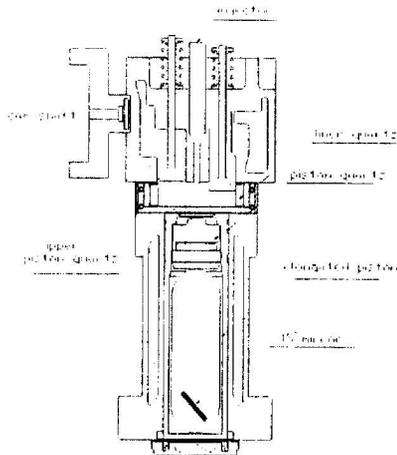


Fig. 1 Single cylinder optical diesel engine

2.2 실험 장치 및 방법

Fig. 2에 나타난 실험 장치 개략도에서 보여지는 바와 같이, 가시화 엔진의 크랭크 축을 유도 전동기 (정격 토크 140 Nm, 15 kW, 6극)에 연결하고 유도 전동기의 회전 수를 인버터 (HYDRIVE-J300)로 귀환 제어하면서 가시화 엔진을 구동시켰다. 또한, 실린더 헤드에 부착한 piezo-resistive형 압력 센서 (KISTLER 6052A, range 0~25 MPa)로 측정된 모터링 압력을 기준으로 TDC (Top Dead Centre)를 결정하였고 가시화 엔진의 캠축에 설치한 엔코더 (360 pulse/rev)의 신호와 딜레이 제너레이터 (DG535)를 사용하여 연료 분사 시기를 제어하였다. 실린더 내로의 연료 분사는 커먼레일용 sac 타입 분사기 (5holes, 직경 0.168 mm/구멍)를 사용하였고, 연료 분사량과 커먼 레일의 압력은 전용 분사기 구동 장치 (TDA 3000H, TEMS Ltd)와 압력 조절 장치 (PCV driver, TEMS Ltd)를 각각 사용하여 제어시켰다. 가시화 엔진은 냉각수 온도 70 °C와 엔진 회전수를 800 rpm으로 고정된 상태에서 연료 분사량, 분사 시기, 분사 압력을 변경시켜 가며 연소 압력을 상기 압력 튜랜스서를 이용하여 측정하였고, 측정된 압력 데이터를 data acquisition system (IOtech WaveBook512)으로 PC에 저장하였다. 또한, 2.1 항에서 설명한 후방 가시화 모듈을 적용하고 고속 카메라 (Kodak Ektapro Motion analyser)를 이용하여 4 KHz의 촬영 속도로 화염을 가시화하였다.

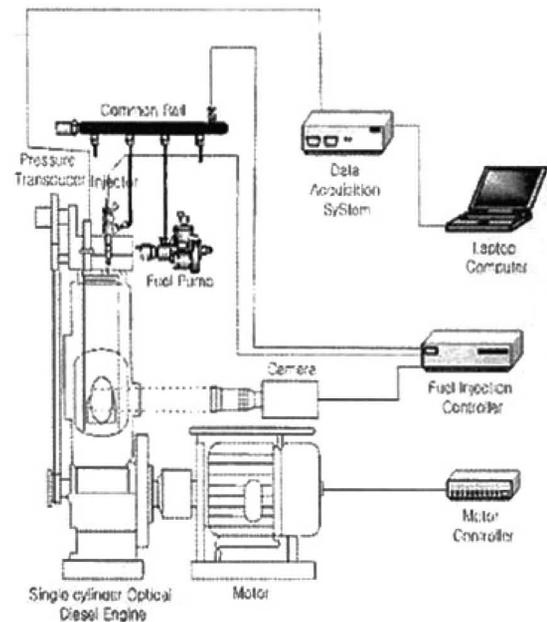


Fig. 2 Schematic diagram of experimental rig

3. 실험 결과

본 실험에서는 가시화 엔진의 기초 연소 특성 및 화염 가시화를 살펴보기 위한 것으로 2.1에서 언급한 세 가지의 가시화 창 중 후방가시화를 위한 가시화 창만을 설치하고 나머지 두 개는 더미 블록으로 대체하여 사용하였다.

3.1 모터링 압력과 연소 중 싸이클 변동

Fig 3은 2.2항에서 설명한 방법에 의하여 연소 과정 없이 엔진을 800rpm으로 모터링 하였을 경우 실린더 내의 크랭크 각에 따른 압력 변화를 측정한 것이다. 가시화 엔진의 모터링시 최고 압축 압력은 3.1 MPa이었다. Fig 4에 제시된 연소 중 싸이클 변동은 연소가 정상적으로 일어나는 대부분의 조건에서 최대 5%의 변동값을 보였다. 따라서, 대부분의 시도된 운전 조건에서는 모터의 귀환 제어에 의한 영향을 받을 것으로 생각된다.

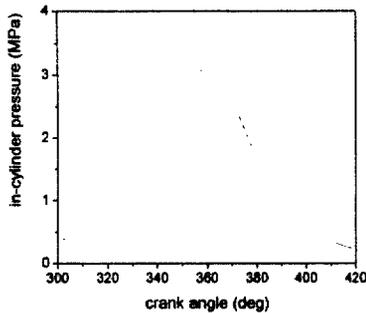


Fig. 3 Motoring in-cylinder pressure at engine 800rpm

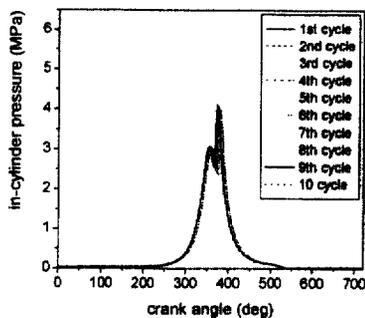
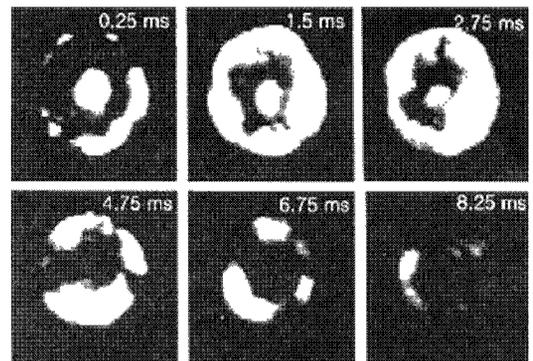


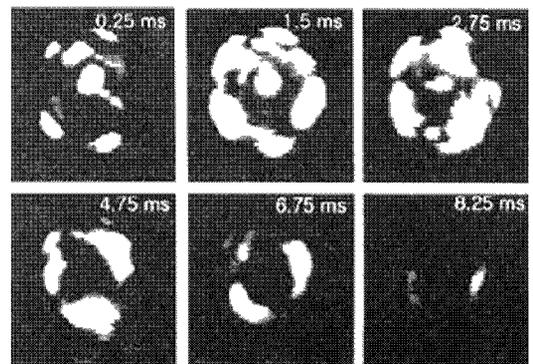
Fig. 4 Cycle-by cycle variation at 60 MPa of injection Pressure and injection timing BTDC 5°

3.2 화염 가시화

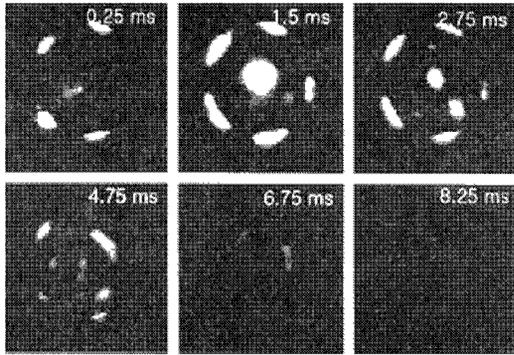
Fig. 5는 연료 분사 시기와 분사 연료량을 각각 BTDC 15°와 15.8mg/stroke으로 고정시키고 분사 압력을 120 MPa, 90 MPa, 60 MPa으로 변경시켜가면서 화염 발달을 가시화한 것이다. 제시된 시간은 화염이 처음 영상에 나타나는 시점으로부터의 시간을 나타내며 대략 0.2ms가 클랭크 각 1°에 해당한다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 분사 압력이 증가함에 따라 휘염도가 높아지고 화염 유지 기간이 길어짐을 알 수 있는데 이는 분사 압력 상승에 따른 분무 특성이 좋아지기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 화염이 발달하는 초기 영역이 분무 끝단과 노즐 팁 부분인 것으로 보아 실린더 내부의 이들 영역에서 화염 생성에 유리한 연료와 공기의 혼합이 이루어 진다는 것을 알 수 있다.



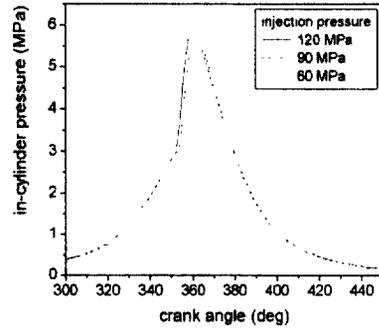
(a) injection pressure 120 MPa



(b) injection pressure 90 MPa



(c) injection pressure 60 MPa

Fig. 5 Flame development at injection timing
BTDC 17 °

(b) injection timing: BTDC 17 °

Fig. 6 Effect of injection pressure on
in-cylinder pressure

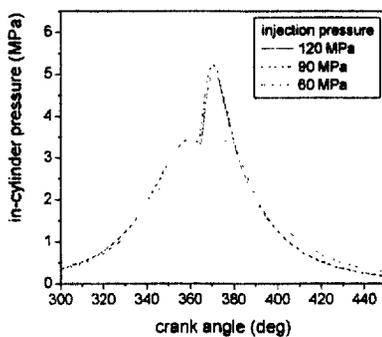
3.3 연소 압력

3.3.1 분사 압력의 영향

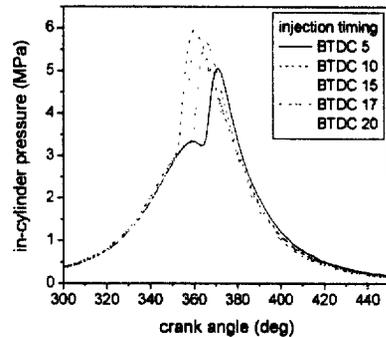
Figs. 6 (a), (b)는 연료 분사 시기가 BTDC 5 °와 BTDC 17 °인 경우에서의 연료 분사 압력 변화에 따른 연소 압력을 보여주고 있다. 높은 분사 압력으로 분사된 연료는 연료의 미립화 촉진으로 점화 지연 감소 및 연소에 유리하게 작용되는데 그림은 이를 잘 보여주고 있으며, 3.2절에서 논한 바와 같이 분사 압력 상승에 따라 화염의 유지 기간이 길고 휘도가 높아졌던 결과와도 부합한다.

3.3.2 분사 시기의 영향

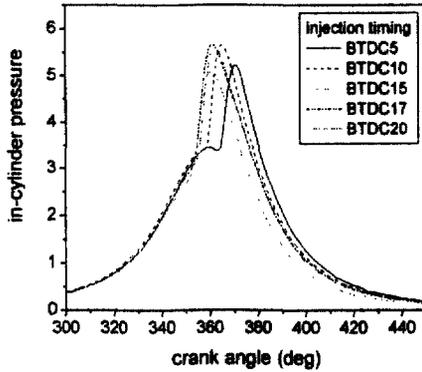
Figs. 7 (a), (b)는 분사 연료량을 15.8mg/stroke로 일정하게 유지시키고 분사 시기에 따른 연소 압력을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 분사 압력이 120 MPa과 90 MPa인 경우, 연소 최고 압력은 분사 시기를 BTDC 5 °에서 BTDC 17 °까지 앞당김에 따라 증가되지만 BTDC 20 °인 경우 감소한다. 이는 일반적인 직접 분사식 디젤 엔진이 BTDC 10 °에서 BTDC 15 ° 사이의 분사 시기 정도에서 점화 지연과 연소 상태 측면의 최적점을 갖는 결과와 부합한다.



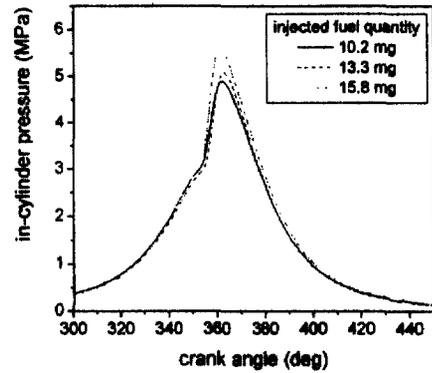
(a) injection timing: BTDC 5 °



(a) common-rail pressure: 120 MPa



(b) common-rail pressure: 90 MPa

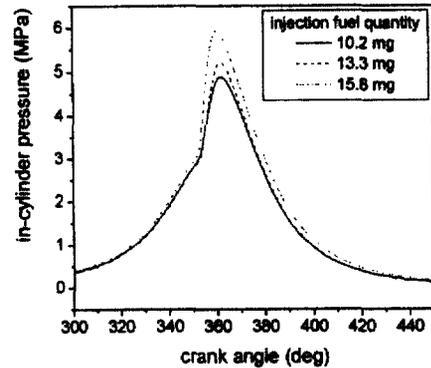


(b) Injection Timing: BTDC 15 °

Fig. 7. Effect of injection timing on in-cylinder pressure

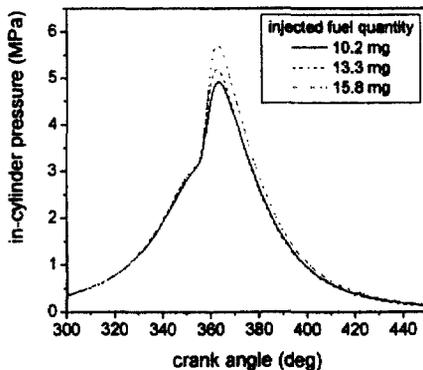
3.3.3 연료 분사량의 영향

분사 압력 120 MPa에서 연소 압력에 미치는 연료 분사량의 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 연료 분사 시기를 고정시키고 분사량을 10.2 mg/stroke, 13.3 mg/stroke, 15.8 mg/stroke로 증가 시킴에 따라 연소 압력은 증가하며 이는 분사 시기에 무관한 경향으로 나타났다.



(c) Injection Timing: BTDC 17 °

Fig. 8. Effect of injected fuel quantity in-cylinder pressure



(a) Injection Timing: BTDC 13 °

4. 결론

커먼레일 분사 시스템을 장착한 단기통 디젤 가시화 엔진을 제작하여 기초 연소 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모터링시 가시화 엔진의 압축 최대 압력은 3.1 MPa으로 나타났고, 대부분의 조건에서 연소 중 사이클 변동은 적었다.
- (2) 높은 분사 압력은 높은 연소 압력과 밝은 화염 휘도 및 연소 기간 연장을 가져왔다. 이는 분사 압력 상승으로 인해 향상된 미립화 특성 때문인 것으로 생각된다.
- (3) 실험을 통해 얻은 화염 이미지 및 연소 압력 결과는 일반적인 직접분사식 디젤 엔진

및 이에 대한 기존의 연구 결과들과 유사한 경향을 보이고 있다.

- (4) 본 연구는 위 결과를 토대로 엔진 가시화를 통한 실린더내에서 유동과 연료 분무와의 관계, 연소 과정 그리고 공해 배출물 특히 검댕의 생성 기구를 밝혀 저연비 고효율 직접 분사식 디젤 엔진을 개발하는 연구가 진행될 것이며 보다 구체적인 연구 결과들을 얻을 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 국가 지정 연구실 (NRL)의 연구비 지원에 의해 수행된 결과이고 가시화 엔진 공동 개발에 참여한 (주) 코리아 엔진텍에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. V. Schwarz, G. Koing, P. Dittrich and K. Binder, Analysis of mixture formation, combustion and pollution formation in HD diesel engines using modern optical diagnostics and numerical simulation, SAE Paper 1999-01-3647, 1999
2. L.W. Jaeger, K. Boulouchos and M. Mohr, Analysis of factors influencing particulate matter emissions of a compression-ignition direct-injection engine, SAE Paper 1999-01-3492, 1999
3. M. Lai, N.A. Henein, A. X. Xie, T.H. Chue, Y. Itoh and W. Bryzik, Diesel cold-starting study using optically accessible engine SAE Paper 952366, 1995
4. C. Beatrice, C. Bertoli, N.D. Giacomo, P. Massoli and M. NA. Migliancio, Combustion behavior analysis in a transparent research engine equipped with a common rail injection system, SAE Paper 2000-01-1825, 2000
5. K. Koyanagi, H. Oing, G. enner and R. Mally, Optimising common rail-injection by optical diagnostics in a transparent production type diesel engine, SAE Paper 1999-01-3646, 1999
6. C. Fettes, S. Scraml, C. Heimgartner and A. Leipertz, Analysis of the combustion process in a transparent passenger car DI-diesel engine by means of multi-dimensional optical measurement techniques, SAE Paper 2000-01-2860, 2000
7. P.H. Lu, J.S. Han, M.C. Lai, N.A henein and

W. Bryzik, Combustion visualizaton of DI diesel spray combustion inside a small-bore cylinder under different EGR and swirl ratios, SAE Paper 2001-01-2005, 2001