

CRDI 디젤엔진의 연료분사시기가 연소특성에 미치는 영향 Effects of the Fuel Injection Timing on the Combustion Characteristics in CRDI Diesel Engine

김주신 · 김경현 · 이한성 · 임상우 · 강희영 · 고대권

J. S. Kim, K. H. Kim, H. S. Lee, S. W. Lim, H. Y. Kang and D. K. Koh

(접수일 : 2010년 11월 01일, 수정일 : 2011년 05월 28일, 채택확정 : 2011년 07월 10일)

Key Words : CRDI diesel engine(커먼레일 디젤엔진), Injection timing(분사시기), Ignition point(착화점), Pmax point(최대연소압력점)

Abstract : This paper describes the engine performance and combustion characteristics of a CRDI diesel engine, operated by electronically controlled diesel fuel injector with variable injection timing. This experiment focused on fuel injection timing and pressure about combustion characteristics of CRDI diesel engine. EGR was excepted because it would be furtherly analyzed with additional experiments. The experiment was conducted under the circumstance of engine torque for 4, 8, 12 and 16 kgf-m and fuel injection timing for 15°, 10° and 5° BTDC, at the engine speed of 1100, 1400, 1700 and 2000 rpm. Fuel injection was controlled to retard or advance initiation of the injection event by electronically controlled fuel injection unit injector on the personal computer. When fuel was injected into the cylinders of a CRDI diesel engine it would go through ignition delay before starting of combustion. Therefore, fuel injection timing of CRDI diesel engine had a significant effect upon performance and combustion characteristics. Depending on the injection timing the fuel consumption rate following the rotational speed and torque was 3~78 g/psh (1.7~30.6%). The range of fuel injection timing that resulted in low fuel consumption overall was BTDC 15-10 degrees.

1. 서 론

오늘날 다량의 화석연료 사용으로 인한 온실가스 배출량의 급증으로 기후변화에 심각한 영향을 미치게 됨에 따라, 온실가스 배출에 대한 규제가 국제적으로 강화되고 있으며, 석유자원의 고갈이 빠른 속도로 진행되고 있는 것에 대한 우려와 친환경적인 대체에너지 개발의 필요성이 대두됨에 따라, 수소에너지, 태양광, 연료전지, 바이오디젤 등의 친환경적인 신재생 에너지 개발에 대한 세계적 관심이 고조되고 있다¹⁾

디젤엔진은 높은 열효율, 고출력 및 내구성 등의 부분에서 타 기관에 비해 우수하기 때문에 상용차를

비롯하여 여러 동력원으로 다양한 분야에서 사용되고 있지만, 고온 확산연소로 인한 유해 배기가스 특히, 질소산화물과 검댕(soot)의 생성과 동시저감의 문제가 되어 왔다. 디젤엔진 연소의 대부분은 연료의 분사시기, 분사율 및 노즐의 형상의 지배를 받아 이루어지고, 박용 대형 디젤엔진에서도 커먼레일 시스템이 도입되어 엔진회전수와 부하에 관계없이 분사시기, 분사기간 등을 제어하는 것이 가능해졌다.

커먼레일 연료분사 엔진은 엔진의 운전조건에 따라서 연료 분사압력과 분사시기 등을 자유롭게 조절할 수 있기 때문에 엔진의 낮은 회전에서도 고압분사가 가능해 연소 면에서도 유리한 장점이 있다. 결국 커먼레일 시스템의 적용으로 인해 디젤엔진은 획기적으로 유해 배기가스를 저감하고, 연비를 향상시킬 수 있는 장점이 있어서 차세대 엔진으로 각광을 받고 있으며, 커먼레일 시스템을 적용한 디젤엔진의 성능 및 배기특성 최적화를 위해서 연료분사 파라미터 변화에 따른 연소특성에 관한 많은 연구가 진행

고대권(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과
E-mail : dkkoh@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6195
김주신, 김경현, 이한성 : 부경대학교 대학원
임상우 : 한국해양수산연수원
강희영 : 부경대학교 기계시스템 공학과

되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 상용 커먼레일 디젤엔진에 장착되어 있는 전자제어장치(ECU)를 제거하고 실험 조건에 따라 전자적으로 엔진제어가 가능한 전자제어장치를 개조 및 장착하여 실험하였으며, 연료 분사 시기와 분사량을 컴퓨터에서 자유롭게 제어하여 이들 파라미터가 디젤연료유의 연소특성(실린더압력, 열발생율, 연소최고압력, 연소최고압력점, 착화지연시간 등)과 연료소비율에 미치는 영향을 분석하고, 엔진의 저속과 고속, 저부하 및 고부하 운전조건에 따라 연료소비율이 최소가 되는 최적분사시기를 찾고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 실험의 장치도이다. 실험에 사용된 엔진은 H사의 D2.0-EURO4 CRDI 과급 디젤엔진으로, 엔진의 사양은 Table 1과 같다. 엔진의 출력을 조정하기 위해서 사용된 동력계는 와전류식 동력계(Eddy current type, 132 kW)를 사용하였고, 수냉식 냉각시스템을 갖추고 있다. 연료소비율은 연료 탱크 아래에 전자저울을 설치하여 일정한 시간을 기준으로 측정하였고, 연료의 분사시기와 분사량은 엔진 ECU와 연결된 컴퓨터를 통해서 조정하였다. 연소실의 압력은 피에조 압력센서를 이용하여 취득하였다.

2.2 실험 방법

실험방법(조건)은 엔진회전수 1100, 1400,1700, 2000 RPM에서 엔진부하를 4, 8, 12, 16 kgf-m로 변화시키고 분사시기를 BTDC 15°, 10°, 5°(deg)로 변경하면서 실험을 하였다. 또한 연료는 시중의 주유소에서 판매하는 경유를 사용하였고, 연소실 분사방식은 싱글분사로 연료분사 압력은 300 bar로 하였다. 엔진의 부하조정은 와전류 동력계를 사용하여 부하별 실험조건에 따라 변경을 해가며 실험을 하였고, 와전류 동력계는 엔진 ECU와는 별개로 독립적으로 동력조정 장치에서 실험자가 직접 조정하였으며, 실험에 있어 가장 핵심 부분인 엔진ECU는 현재 경주용 자동차에 탑재되어 엔진을 전자적으로 제어하는 MoTeC사의 제품을 사용하였으며, 파라미터를 연구자 실험계획조건에 따라 연소최고압력 및 열발생율, 누적열발생율, 연소최고압력점, 착화지연각, 착화지연 시간에 대하여 실험하였다. 또한, 실험 시 데이터들은 해석 소프트웨어 시스템의 일종인 프로그램으로

LabVIEW를 사용하고, 해석된 데이터를 그래프로 표현 할 수 있는 프로그램인 Origin을 사용하였다.

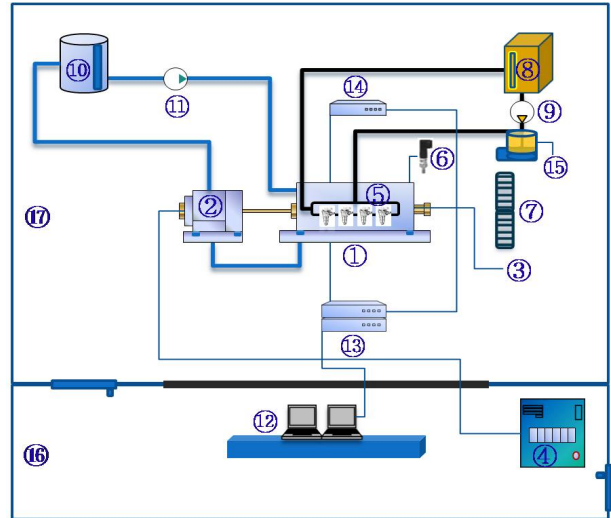


Fig. 1 Schematic diagram of test rig

- ① Diesel engine
- ② Dynamometer
- ③ Encoder
- ④ Dynamometer controller
- ⑤ Common rail
- ⑥ Pressure sensor
- ⑦ Radiator & inter cooler
- ⑧ Fuel tank
- ⑨ Fuel pump
- ⑩ Water Tank
- ⑪ Water pump
- ⑫ Computer
- ⑬ Engine ECU
- ⑭ Unit injector driver
- ⑮ Electromagnetic scale
- ⑯ Engine control room
- ⑰ Engine room

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Type	4-cylinder 4-stroke CRDI diesel engine with exhaust T/C
Compression ratio	17.3 : 1
Displacement	1,991 (cm ³)
Bore	83(mm)
Stroke	92(mm)



Photo. 1 Experimental setup

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 엔진의 회전속도 및 연료분사시기가 연소특성에 미치는 영향

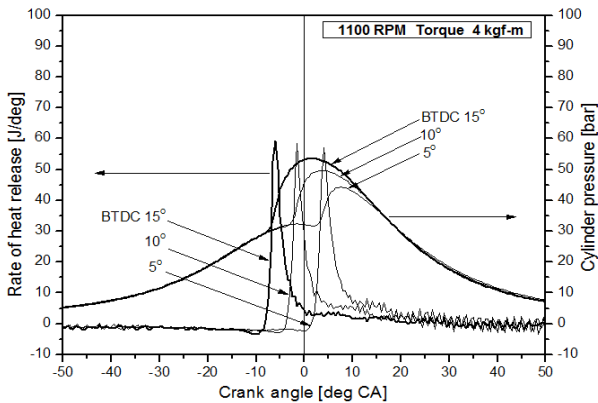
Fig. 2(a)는 엔진회전수 1100 rpm, Torque 4 kgf-m 실린더 압력과 열발생율의 곡선을 나타내고 있다. X축은 연료분사시기를 뜻하며, Y축의 왼쪽부분은 열발생율로 단위크랭크 각도 1°(deg)당 연료가 분사되어 점화까지 걸리는 시간을 뜻한다 오른쪽은 실린더 압축압력을 나타낸다. 저속, 저부하 운전조건에서는, 연료분사시간이 짧기 때문에 확산연소량은 적고, 예혼합연소가 대부분이므로, 압축압력 및 온도는 분사시기와 관계없이 거의 일정하게 유지되고 착화지연 기간 도 거의 일정하게 유지되었다.

연료분사시기가 늦어지면 착화점도 지연되어 연소 최고압력은 감소하고 최고압력점은 늦어짐을 알았다.

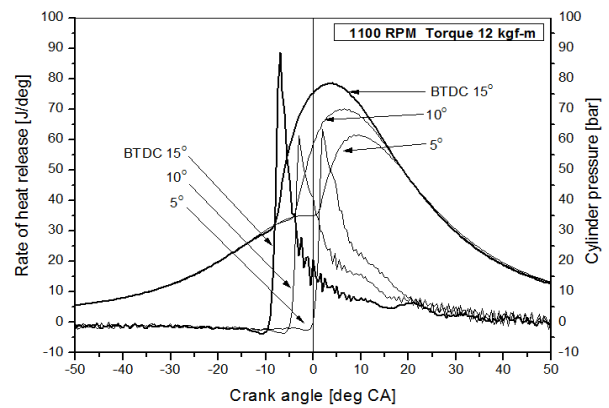
Fig. 2(b)는 엔진회전수 2000 rpm, Torque 4 kgf-m 실린더 압력과 열발생율의 곡선을 나타내고 있다.

분사시기를 BTDC 15°, 10°, 5°(CA)로 조정하였을 때 착화지연시간은 분사시기별 790 μ s, 665 μ s, 624 μ s, 지연각도, 9.5°, 8°, 7.5°(CA)로 차이를 보이며, 연소 최고압력은 분사시기별 53.8, 48.5, 40.2, 최고압력점 6.5, 8.5, 14로 큰 차이를 보이고 있다. 착화점이 늦어짐에 따라 연소끝점이 지연되므로, 연료분사시기가 늦어지면 실린더 잔류연소가스의 온도가 상승하여 다음 사이클의 압축압력 및 온도가 상승하였다.

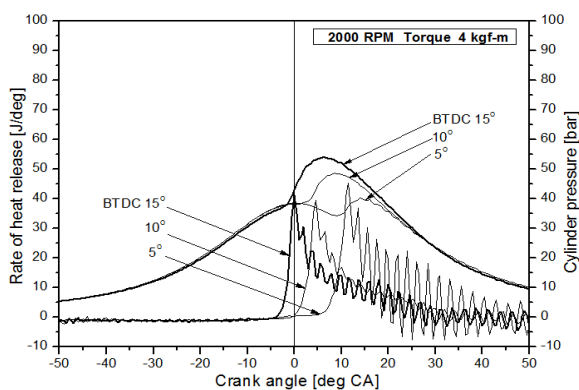
Fig. 3(a)은 저속, 고부하 운전조건에서 실린더 압력과 열발생율의 곡선을 나타내고 있다. 연료분사량 및 분사시간이 길어져서 확산연소량이 증가하여 연소실 온도가 증가하므로 착화지연기간 동안 많은 연료가 증발하여 예혼합연소량이 증가함을 알 수 있으며, 특히 연료분사시기가 상사점전 15도인 경우가 이



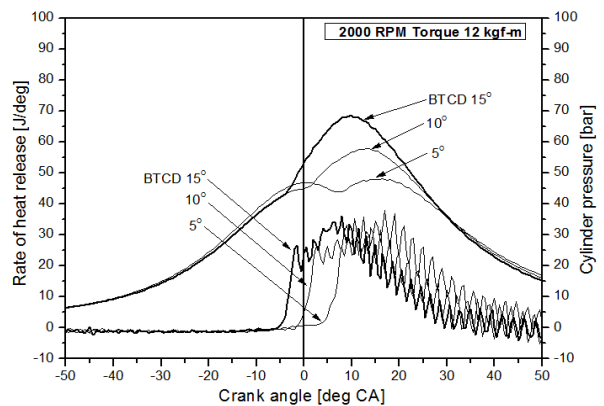
(a)



(a)



(b)



(b)

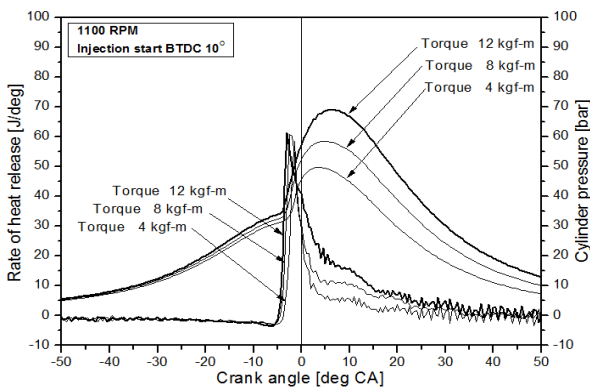
Fig. 2 Effects of fuel injection timing on cylinder pressure and heat release rate at low load (4 kgf-m), 1100rpm(a) and 2000rpm(b).

Fig. 3 Effects of fuel injection timing on cylinder pressure and heat release rate at high load (12kgf-m), 1100rpm(a) and 2000rpm(b).

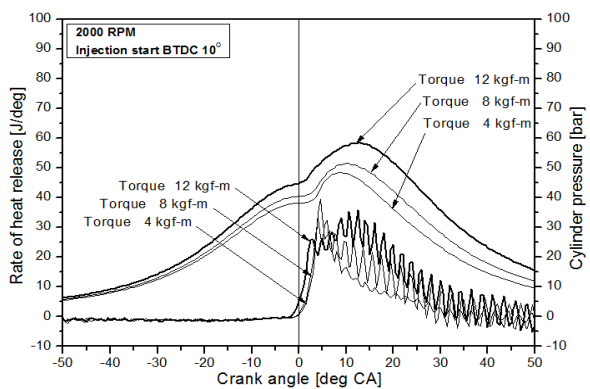
와 같은 현상이 현저하게 나타났다. 예혼합연소량의 증가로 인하여 실린더 압력이 급상승하고 연소최고 압력도 증가하여 디젤노크 발생위험이 높은 것을 알 수 있다. 고속, 고부하 운전에서는 연료분사량 및 분사시간이 길어져서 확산연소량이 증가하지만, 저속운전시와는 달리 크랭크 각도 1도당 소요되는 시간이 절반 가까이 짧아지기 때문에 착화점이 저속운전시보다 늦어짐을 알 수 있다.

단위 크랭크 각도당의 연소량 (열발생률)도 저속운전시보다 크게 감소하기 때문에, 실린더 연소압력 상승률이 감소하여 착화 후의 급격한 연소압력 상승은 둔화된 것을 알 수 있다.

Fig. 3(b)고속, 고부하 운전조건에서 실린더 압력과 열발생율의 곡선을 나타내고 있다. 연료분사시기가 늦어지면 연소끝이 지연되어, 실린더 잔류 연소가스의 온도가 상승하고, 압축소요시간이 단축되어 실린더 벽으로의 전열량 및 가스 누설량의 감소로 인하여 다음 사이클의 압축압력 및 온도의 상승현상이 두드러지게 나타남을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 4 Effects of fuel injection timing and torque on cylinder pressure and heat release rate at 1100rpm(a) and 2000rpm(b).

3.2 엔진의 부하 및 연료분사시기가 연소특성에 미치는 영향

Fig. 4는 저·고속 운전조건하에서 부하변화의 연소특성인 실린더 압력과 열발생율의 곡선을 나타내고 있다. Fig. 4(a)는 저속운전 조건에서는 연료분사량이 증가함에 따라 예혼합연소량은 거의 일정하지만, 확산연소량은 증가함을 알 수 있다. 연료분사량이 증가함에 따라 연소실 온도 상승으로 인하여 압축압력 및 온도가 상승하고 착화지연기간이 짧아졌다. 또한 연소최고압력은 크게 상승하고 연소최고압력점은 늦어짐을 알 수 있다.

Fig. 4(b)는 고속운전 조건에서는 저속 운전시와 같이 연료 분사량이 증가함에 따라 예혼합연소량은 거의 일정하나 확산연소량이 증가함을 알 수 있으며, 예혼합연소량은 저속운전시보다 감소하였다.

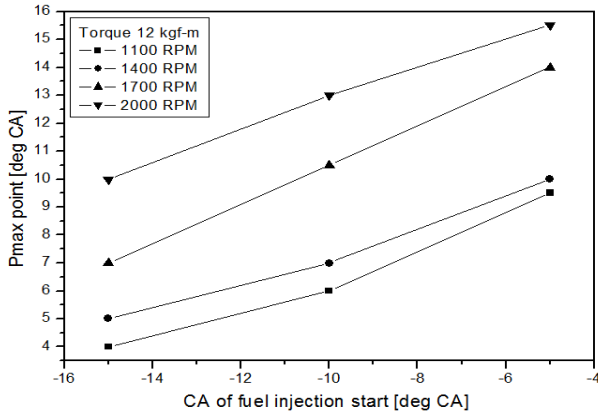
엔진 회전속도의 증가로 인한 크랭크 각도 1도당 소요시간이 절반 가까이 감소하여 착화점이 늦어짐으로 인해서 연소최고압력이 감소하고 연소최고압력점도 늦어졌다.

그러나 연소끝점이 늦어짐으로 인해서 잔류연소가스의 온도 상승과 압축시간 단축으로 실린더 벽으로의 전열량 및 압축공기의 누설량 감소로 인하여 압축압력 및 온도는 저속운전시보다 현저하게 증가함을 알 수 있다.

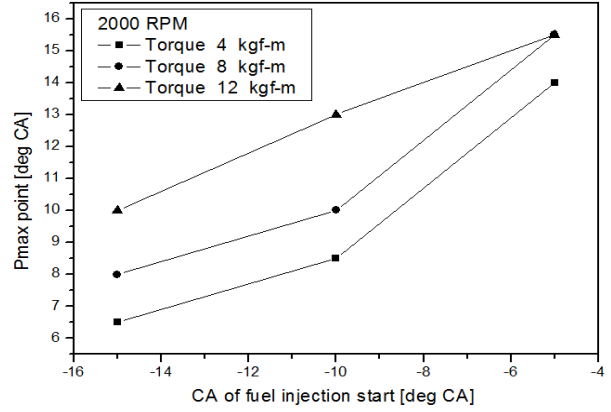
3.3 연료분사시기가 연료소비율에 미치는 영향

Fig. 5는 연소최고압력점과 연료소비율을 나타내고 있다. Fig. 5(a)는 연소최고압력점을 나타내고 있으며, 고부하 운전조건에서 엔진회전수 증가에 따른 연소최고압력점과 연료소비율을 나타내고 있다. 최적 연료분사시기는 상사점전 15~10도 범위에 있으며, 연료소비율(sfc)이 최소인 최적 연소최고압력점은 상사점 후 5~10도 범위에 있으며, 엔진회전수가 증가함에 따라 늦어지는 경향을 나타내고 있다.

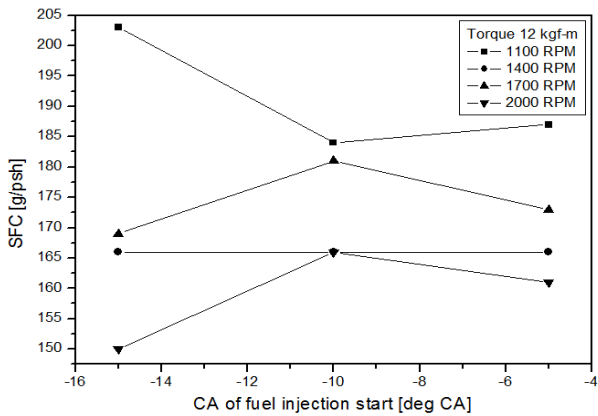
Fig. 5(b)는 Torque 12 kgf-m에서 1100 rpm, 1400 rpm, 1700 rpm, 2000 rpm로 증가시켰을 때 회전수별 연료소비율 분포를 나타내었다. 각 회전수별 부하증가 시 저부하시와는 달리 넓은 분포를 나타내고 있고 분사시기는 BTDC 15°, 10°에서 연료소비율이 평균적으로 가장 작게 나타났다. 회전수가 높아질수록 연료소비는 불규칙적으로 작용하지만, 분사시기가 BTDC 15° 10°에서는 연료소비율이 가장 적게 나타났다.



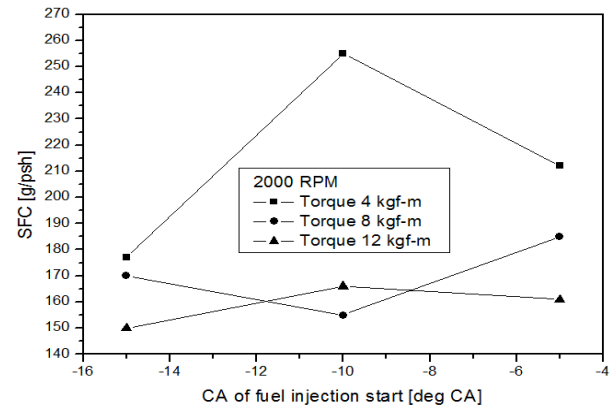
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 5 Effects of fuel injection timing and rpm on maximum cylinder pressure point(a) and sfc(b) at high load (12 kgf-m).

Fig. 6 Effects of fuel injection timing and torque on maximum cylinder pressure point(a) and sfc(b) at high load (2000rpm).

연료소비율은 최고압력점과 관계가 깊으며, 저 부하 일 때 보다는 연료소비율이 분사시기별 낮은 것으로 나타나고 있다.

Fig. 6(a)는 고속운전 조건에서 부하(토크) 증가에 따른 연소최고압력점을 나타내고 있으며, Fig. 6(b)는 고속운전시 회전수별 연료소비율을 분사시기별로 나타내고 있다. 전반적으로 부하에 따른 분사시기별 연료소비율의 차이는 BTDC 15°, 10°를 5°와 비교했을 때 대략 분사시기별 19~78g/psh 정도의 차이를 보이고 최적 연료분사시기는 상사점전 15~10도 범위에 있으며 최적 연소최고압력점은 상사점후 6.5~10도 범위에 있으며 엔진회전수 및 부하 증가에 따른 최적 연소최고압력점은 전체적으로 늦어지는 경향을 나타내었다.

Fig. 7은 엔진회전수 및 부하의 변화에 따른 연료소비율이 최소인 최적 연료분사시기의 범위에 대하여 실험결과를 나타내었다.

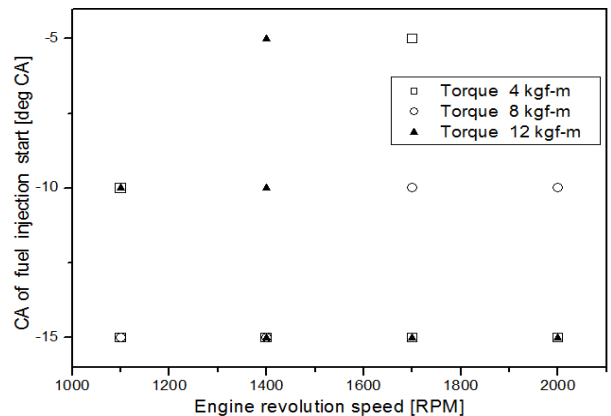


Fig. 7 Optimum fuel injection timing for minimum sfc at various rpm and torque.

1100rpm에서 전체적으로 부하변화에 따른 연료절감은 분사시기별 BTDC 15~10도 범위에서 3~20g/psh (1.7~8.2%)였다. 1400rpm에서 전체적으로 부하변화에 따른 연료절감은 분사시기별 BTDC 15도

범위에서 20~23g/psh (10~10.7%), 1700rpm에서 전체적으로 부하 변화에 따른 연료절감은 분사시기별 BTDC 15~5도 범위에서 7~12g/psh(3.9~5.8%), 2000rpm에서 전체적으로 부하변화에 따른 연료절감은 분사시기별 BTDC 15~10도 범위에서 16~78g/psh (9.7~30.6%)로 나타났다.

4. 결 론

CRDI 디젤엔진에서 연료 분사시기가 연소특성에 미치는 영향에 관한 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 저속, 저부하 운전조건의 연소특성은 연료분사기간이 짧기 때문에 확산연소량 및 예혼합연소가 거의 일정하였으며, 연료분사시기와 관계없이 압축압력 및 온도, 착화지연 기간은 일정하게 되는 반면, 고부하 운전조건에서는 연료분사량 및 분사기간이 길어져서 확산연소량의 증가에 따라 연소실 온도상승으로 예혼합연소량이 증가함을 알 수 있었다.

2) 저속운전 조건에서 부하변화에 따른 연소특성은 연료분사량이 증가함에 따라 예혼합연소량은 거의 일정하지만, 확산연소량은 증가하였고, 고속운전 조건에서의 부하변화에 따른 연소특성은 예혼합연소량 보다는 확산연소량이 증가하였고, 예혼합연소량 및 확산연소량 증가로 다음 연소특성에 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

3) 연료분사시기에 따른 연소특성 중 최고압력과 최고압력점은 연료소비율에 직접적인 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

4) 전체적으로 부하변화에 따른 연료절감은 분사시기별 BTDC 15~10도 범위에서 16~78g/psh(9.7~30.6%)로 나타났다.

지금까지 연구결과로 볼 때 이러한 실험결과들은 경유의 분사시기에 따른 연소특성을 기본데이터로 활용하여 향후 압력분석 및 경유를 혼합한 바이오디젤 실험 분야에 크게 기여할 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. L. Postrioti, C. N. Grimaldi and M. Ceccobello, 2004, "Diesel Common Rail Injection System Behavior with Different Fuels", SAE Paper, 2004-01-0029.
2. W. Hannibal, Mark A. Mohr and Rudolf Flierl,

- 2004, "Potential of a Mechanical Fully-Variable Lift System for Engines with a Side-Mounted Camshaft", SAE Paper, 2004-01-1359.
3. F. Yang and O. Minggao, 2003, "Experimental Research on EGR in a Diesel Engine Equipped with Common Rail Injection System", SAE Paper, 2003-01-0351.
4. B. Fulton and L. Leviticus, 1993, "Variable Injection Timing Effects on the Performance and Emissions of a Direct Injection Diesel Engine", SAE Paper, 932385.
5. P. Carlucci, A. Ficarella and D. Laforgia, 2003, "Effects of Pilot Injection Parameters on Combustion for Common rail Diesel Engines", SAE Paper, 2003-01-0700.
6. H. K. Gangwar and A. K. Agrwal, 2008, "Combustion Characteristics of Jatropha Oil Blends in a Transportation Engine", SAE Paper, 2008-01-1383.
7. Heywood, J. B., Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 503-517.
8. H. Heisler 1995., Advanced Engine Technology. College of North West London Willesden Centre London, UK pp. 213-222.