

파일럿 분사시의 커먼레일식 직분식 가시화 디젤엔진의 연소 및 Soot분포 특성에 관한 연구

이재용¹⁾ · 한용택^{*1)} · 이기형²⁾ · 이창식³⁾

한양대학교 대학원¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾ · 한양대학교 기계공학과³⁾

A Study on the Combustion Characteristic and Soot Distribution of a Common Rail Type D.I.Diesel Visualized Engine with Pilot Injection

Jaeyong Lee¹⁾ · Yongtaek Han^{*1)} · Kihyung Lee²⁾ · Changsik Lee³⁾

¹⁾Graduate School, Hanyang University, Gyeonggi-do 425-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do 425-791, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 26 May 2003 / Accepted 22 September 2003)

Abstract : The objective of this work is to investigate the effect of swirl, injection pressure and pilot injection on D.I. diesel combustion by using a transparent engine system. The test engine is equipped with common rail injection system to obtain high pressure and to control injection timing and duration. In this study, the combustion analysis and steady flow test were conducted to estimate the heat release rate from in-cylinder pressure. Soot distribution in diffusion flame according to swirl ratio, injection pressure and pilot injection was investigated by using LII technique. As the results, high injection pressure was found to shorten ignition delay as well as enhance peak pressure and heat release rate was greatly affected by injection timing and pilot injection. In addition, the results showed that the period of soot formation corresponded to the diffusion flame.

Key words : Common rail(커먼레일), Swirl(스웰유동), Injection pressure(분사압력), Transparent engine(가시화 엔진), LII(Laser induced incandescence(레이저유도 백열법))

1. 서론

연비와 내구성 면에서 우수한 장점을 가지고 있는 디젤엔진은 다른 내연기관에 비하여 열효율이 최고 45%정도 우수하고, 30~35%까지 탄소 배출을 줄일 수 있으므로 한정된 화석연료자원과 최근 지구 온난화 문제로 심각하게 대두되고 있는 CO₂ 규제를 생각해 볼 때, 현재 및 미래의 동력원 중에서 가장 중요한 기술의 하나임이 분명하다.¹⁾ 이와 같

이 디젤엔진은 가솔린 엔진에 비하여 많은 장점을 가지고 있는 반면 직접 분사식의 경우 실린더 내로 연료가 직접 분사되므로 분사된 연료 분무 주위에는 공간적으로 불균일한 공연비 분포가 발생되어 농후영역에서는 입자상물질(P.M)이 생성되며 이온 공연비 영역에서는 질소산화물(NOx)이 증가하는 단점을 가지고 있다.²⁾ 이러한 연구들은 다양하게 수행되고 있으며,³⁾ 이러한 연구들은 공기와 연료의 혼합을 촉진하기 위하여 연소실 내에 파일럿(Pilot)분사와 커먼레일을 사용한 고압분사 방식을 사용하여 NOx와 Soot 발생을 동시에 저감시키는 연구결과들

*To whom correspondence should be addressed.
rthan102@hanmail.net

을 보고하고 있다.⁴⁾ 이와같이 커먼레일을 사용한 분사의 경우 분사압이 증가할수록 주변공기와의 운동량 교환이 증가하기 때문에 연료의 미립화 및 혼합에 큰 역할을 하는 것으로 알려져 있으나,⁴⁾ 스윙과 분사율 변화에 따른 연소특성 및 Soot 분포특성에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 직분식 디젤엔진의 연소형태에 파일럿분사 및 연료 분사압이 미치는 영향을 커먼레일 분사 장치를 장착한 가시화 엔진을 이용하여 분사초기의 연소실 내 압력데이터를 사용한 열 발생을 곡선을 통하여, 분사 시기별로 평가해 보았다. 또한 디젤엔진의 Soot 분포를 측정할 수 있는 LII(Laser Induced Incandescence)기술을 확립하여 운전조건과 스윙변화에 따른 Soot 형성과정과 분포특성을 파악하였다.⁵⁾

2. 실험장치 및 방법

2.1 연료분사 장치

본 연구에서는 고압의 분사압력과 분사시기의 조절을 위하여 커먼레일 방식의 연료분사장치를 제작하여 사용하였다. 공압을 사용한 고압펌프(Haskel)를 두개 장착하여 최대 1500bar 까지 레일내부의 압력을 높였으며, 서지탱크를 장착하여 연료분사 시 레일 내부의 급격한 압력변화를 방지하였다. 인젝터는 분사각 135°의 5공 인젝터(Bosch)를 사용하였으며 연료분사제어는 캠 축에 부착된 엔코더의 Z상과 전용의 인젝터 드라이버(TDH-3200)를 사용하여 분사시기 및 분사기간을 조절하였다.

2.2 가시화엔진

스윙 유동 및 분사압력의 변화가 분무 및 연소형태에 미치는 영향을 직접 관찰하기 위하여 단기통 가시화엔진을 사용하였다. 연소실내에 직경 50mm의 투명한 Bowl-in-piston을 설치하여 가시화 하였으며, 연소 시 고온과 고압에 견디기 위하여 석영유리로 만들어진 관측창을 제작하였다. 또한 청결도를 유지하기 위하여 무윤활 방식을 사용하였으며 테프론링을 피스톤에 부착하여 기밀을 유지하였다. 엔진의 헤드는 기존의 상용 단기통 엔진헤드(대동)를 가공하여 커먼레일 타입 인젝터를 직립으로 장착하

였고, 스윙유동에 변화를 주기 위하여 흡기포트 형상이 헬리컬(helical)모양과 직립형 두가지 종류를 사용하였다. 실험에 사용한 가시화 엔진의 주요제원은 Table 1과 같으며, 개략도를 그림 1에 나타내었다.

Table 1 Specification of the engine

Bore×Stroke	95×95	Swirl ratio	0,2.1
Displacement volume	675cc	Comp. ratio	19

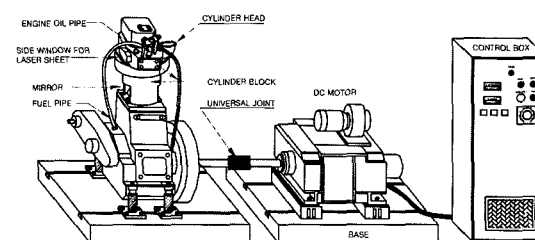


Fig. 1 Schematic of a transparent engine

2.3 LII를 이용한 soot 측정법

본 연구에서는 LII 측정기술(입사파장:532nm)을 사용하여 soot를 가시화하기 위하여 full mirror와 450swp(short wave pass filter)를 이용하여 LII신호를 취득하였다. 분사시기는 BTDC 6°와 10° 및 14°의 세 경우로 하였으며 촬영시기는 ATDC 4°와 8° 및 12°로 선정하였다. 그림 2는 LII측정을 위하여 구성한 광학계의 개략도이다. 본 실험에서는 LII신호를 취득하기 위하여 ICCD카메라를 사용하였으며 ICCD 카메라의 노출시간은 40ns로 선정하였다.

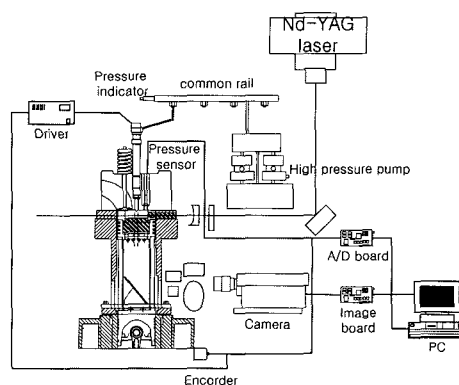


Fig. 2 Schematic of LII technique

다음의 그림 3은 LII실험을 위하여 설치한 관측창을 나타낸 그림이다. 그림에서도 알 수 있듯이 레이저가 도입될 수 있는 관측창에 2개의 Quartz를 장착하여 연소시에도 레이저가 투과 될 수 있도록 시스템을 구성하였다.

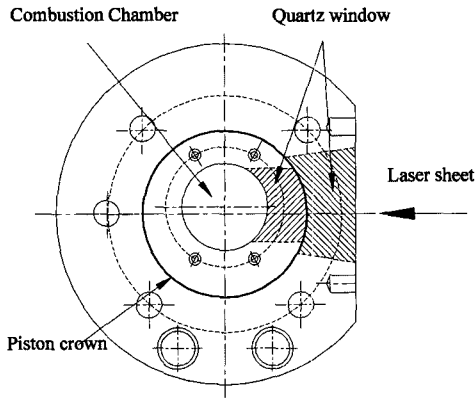


Fig. 3 Shape of the optical window

2.4 실험방법

포트 형상에 따른스윙 유동의 생성을 확인하기 위하여 정상유동 실험을 수행하였다. 정상유동 실험장치와 스윙비 및 흡입유량 계수의 정의는 이미 다른 논문⁶⁾에서 보고한 바가 있으므로 생략하였다. 연료의 분사량은 헤드의 종류 및 분사압의 변화에도 공연비를 44로 일정하게 유지할 수 있도록 분사기간을 조절하였고 엔진 회전수는 정 출력 방식의 DC 모터를 사용하여 400rpm으로 고정하였다. 그리고 연소시에는 헤드의 온도를 가열판을 사용하여 80°로 유지하였으며, 헤드 상단면에 피에조식 압력 센서(6052A,Kistler)를 장착하여 캠 축에 부착된 엔코더 신호와 연동하여 연소실 압력을 PC와 A/D보드(PCI-6035,NI) 및 전용언어(Labview,NI)을 사용하여 취득하였다. 본 연구에서 사용한 실험 조건들은 Table 2와 같다.

Table 2 Specification of the engines

Rail pressure	500.700.1000 bar
Fuel quantity	14.5(w/o)swirl 13.4(w/swirl)
Injection timing	BTDC6°, BTDC10°, BTDC14°
Air fuel ratio	44

3. 실험 결과

3.1 흡기포트 형상에 따른 정상유동 특성

헬리컬 포트 형상과 직립형 포트 형상에 대한 스윙 및 흡입유량 특성을 측정하여 그림 4에 그 결과를 나타내었다. 이 그림으로부터 공기 포트형 사이 휘어진 헬리컬 형상의 경우 유량계수는 밸브리프트가 늘어날수록 직립형 흡기포트를 장착한 경우보다 조금씩 줄어드는 반면 무차원 스윙비는 모든 밸브리프트영역에서 우수한 특성을 나타내는 사실을 알 수 있었다. 즉 헬리컬형 흡기포트를 가진 경우는 직립형 흡기포트에 비하여 우수한 스윙유동 특성을 가지고 있음을 확인하였다.

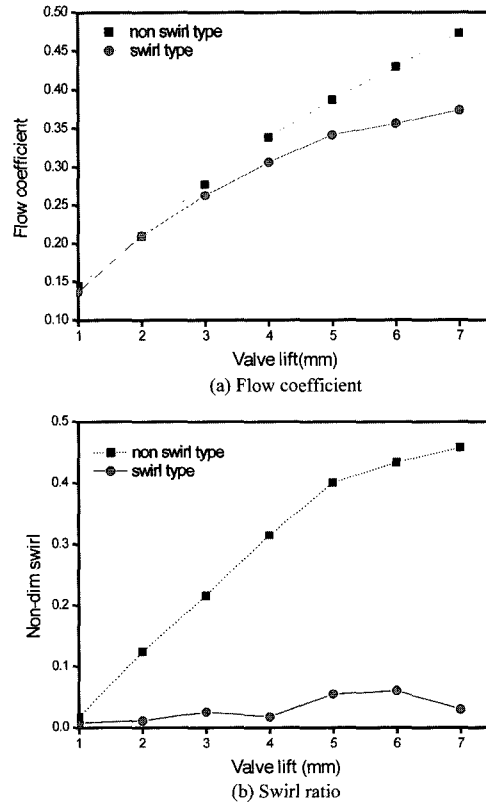


Fig. 4 Results of steady state flow experiment

3.2 분사조건 및 스윙비에 따른 연소특성

최근 디젤 엔진의 효율향상을 위하여 주목을 받고 있는 파일럿 분사의 연소특성을 분석하기 위하여 파일럿 분사와 메인 분사의 분사시기, 분사량, 스

월유동, 분사압력⁷⁾에 대하여 실험을 수행하였다.

3.2.1 분사시기의 영향

먼저 분사시기에 따른 연소 특성을 파악하기 위하여 분사압력을 1000bar로 고정시키고 파일럿 분사시기를 BTDC 6°와 10° 및 14°의 세 경우로 변화시켰을 때의 열발생율을 측정하여 그 결과를 그림 5에 비교하였다. 이때의 메인 분사시기는 TDC로 고정하였다.

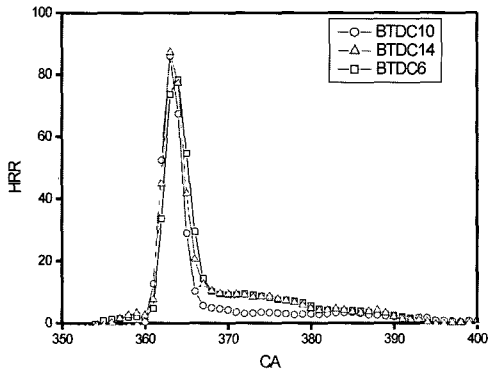


Fig. 5 Comparison of heat release rate(I.P.=1000bar,10:90)

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 BTDC10°분사시기에서 가장 활발히 연소가 진행되고 있음을 알 수 있다. 이 보다 분사시기를 전후로 4°씩 변화시킨 BTDC6°와 14°의 경우 확산 연소기간과 예혼합 연소기간이 길어지는 형태를 보이고 있다. 이러한 현상은 파일럿 분사된 소량의 연료가 착화하여 메인 분사연소실내의 온도와 압력이 파일럿 분사시기에 따라서 달라지기 때문에 발생된다고 여겨진다.

이러한 결과로부터 파일럿 분사 후 메인 분사까지는 적절한 시간을 확보하는 것이 디젤엔진에 유리하다는 사실을 알 수 있다. 다음은 동일한 분사 조건에 대하여 분사압력을 500bar로 고정하였을 경우 열발생율을 측정하여 그 결과를 그림 6에 나타내었다.

이 결과는 분사압력이 1000bar 인 경우와는 다소 상이한 양상을 보이고 있다. 최대 열발생율은 BTDC10° 인 경우가 가장 크게 나타나지만, 예혼합 연소기간은 BTDC14°의 경우가 가장 짧게 나타나고 있다. 이는 분사압력이 낮을 경우 연료의 레벨이 낮아지므로 파일럿 분사를 일찍시켜서 파일럿 분사된

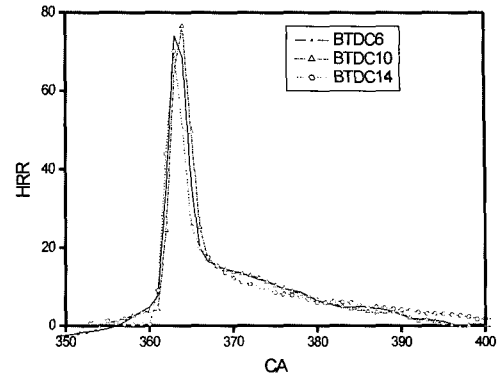


Fig. 6 Comparison of heat release rate(I.P.=500bar, 10:90)

연료의 착화에 의한 연소실내 온도상승이 미립화 연료와 공기의 혼합을 원활히 이루어지도록 하기 때문으로 판단된다.

3.2.2 분사량의 영향

파일럿 분사와 메인 분사의 분사량 비율에 따른 연소특성을 파악하기 위하여 세가지 분사량 비율로 나누는 경우와 single 분사의 경우에 대하여 실험을 수행하여 얻는 열발생율 비교결과를 그림 7에 나타내었다.

분사량비가 10:90인 경우에서 다른 분사량비율에 비하여 예혼합 열발생율이 가장 증가하고 있으며, 확산연소구간이 길어짐을 알 수가 있다. 이는 파일럿 분사량이 증가되면 동일 공연비 조건에서 메인 분사량이 줄어들게 되어 메인 분사시기의 절대적 혼합기량이 줄어들 뿐만 아니라 파일럿 분사의 연소가 증가하여 메인 분사의 착화지연이 감소하게

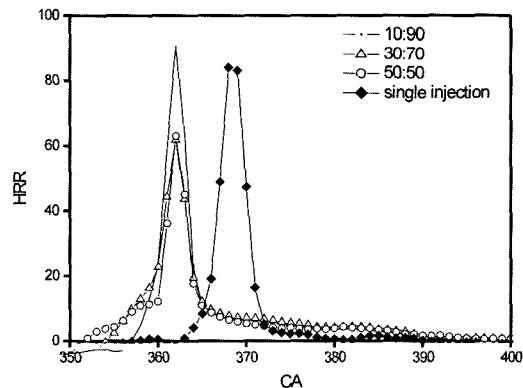


Fig. 7 Comparison of heat release rate with pilot injection (I.T=BTDC10,I.P.=1000bar)

되므로 이러한 현상이 일어나게 된다고 여겨진다. 또한 single 분사시는 많은 연료가 한번에 분사되므로 기화하기까지 시간이 증가 되므로 열발생율이 일어나는 시기가 파일럿 분사보다 늦어지는 특징을 보이고 있다.

3.2.3 스월의 영향

그림 8은 파일럿 분사와 메인 분사의 분사량비율이 10:90인 경우에 대하여 스월유동의 유무에 따른 열발생율 형태를 비교한 그림이다.

스월유동이 존재할 경우 예혼합 연소구간의 최대 열발생율이 높아질 뿐만 아니라 후연 기간도 작아짐을 알 수 있다. 이로 미루어 보아 파일럿 분사시 스월유동으로 인하여 공기와의 혼합이 증진되어 연소가 촉진되는 것을 알 수가 있었다.

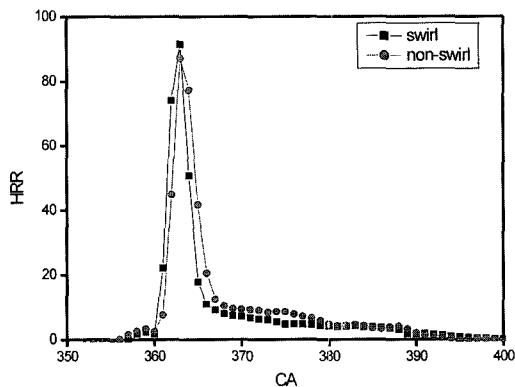


Fig. 8 Comparison of heat release rate with swirl flow (I.T=BTDC6, I.P=1000bar)

3.2.4 분사압력의 영향

연소특성에 미치는 분사압력의 영향을 파악하기 위하여 분사량 비율을 10:90으로 고정한 상태에서 두 경우의 분사압력에 대한 열발생율을 비교하여 그림 9에 나타내었다.

분사압력에 따라서 예혼합 연소구간의 최대 열발생율이 현저히 변화되는 것을 이 그림에서 알 수가 있었다. 이러한 현상은 분사압력이 높아질수록 연료의 미립화가 촉진되므로 이로 인하여 파일럿 분사량의 연소가 저감되고 메인 분사량이 촉진되어 예혼합 연소구간의 최대 열발생율이 증가하는 형태를 보이고 있다고 여겨진다.

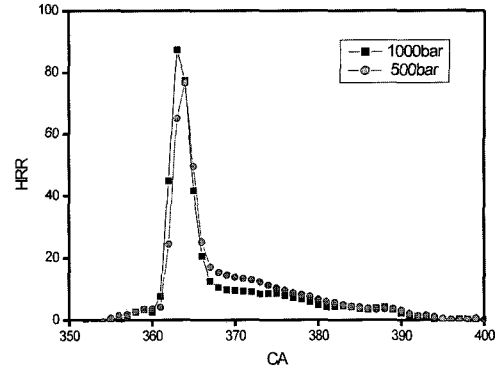


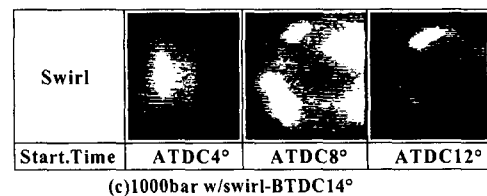
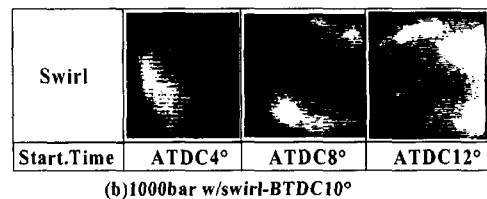
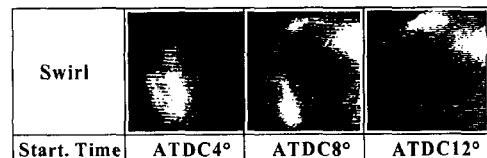
Fig. 9 Comparison of heat release rate with rail pressure (I.T=BTDC10)

3.3 운전조건에 따른 연소실내의 soot 분포특성

본 실험의 LII 사진의 결과들은 스월의 영향을 고려하여 나타낸 분사시기, 분사량, 분사압력에 대하여 촬영한 사진의 결과이다.

3.3.1 분사시기에 따른 Soot의 형성특성

다음은 분사시기에 따른 soot 분포 특성을 측정하였고(a~c), 또한 기존의 동일한 가시화엔진에서 고찰한 single 분사일 경우, 분사시기에 따른 soot 분포 특성사진⁸⁾을 그림 10(d), (e), (f)에 나타내었다.



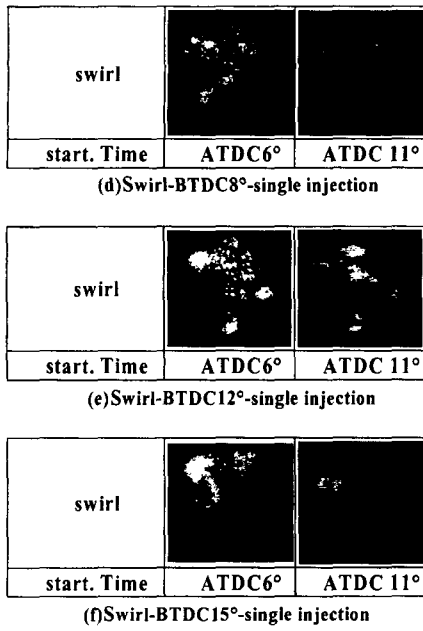


Fig. 10 Comparison of soot formation with injection timing BTDC 6°, 10°, 14°, ratio of pilot & main injecton 30:70 and single injection

이 그림에서 알 수 있듯이 분사압력 1000bar 인 경우 BTDC 10°에 분사 하였을 때 LII 신호가 비교적 약하게 나타나고 있으나 파일럿 분사시 분사시기에 따른 LII 강도는 비교적 유사한 것으로 보인다. 이러한 현상은 분사시기에 따른 열 발생율을 측정 한 결과와 일치하고 있다. 그러나 기존의 동일한 가시화 엔진에서 단일분사에 따른 LII 측정결과에서는 분사시기가 BTDC 12°인 경우에 LII의 신호가 가장 강하게 나타나는데 이런 현상은 촬영시기의 열발생율이 이 분사시기에서 가장 높기 때문인 것으로 즉, 다른 분사조건에 비하여 연소가 가장 활발하며, 특히 촬영시기는 확산연소기간 중이므로 soot의 발생이 가장 크다고 보고 된 바가 있다. 따라서 파일럿 분사와 단일 분사시에 분사시기에 따른 soot의 분포특성은 서로 상이하다는 것을 알 수 있다.

3.3.2 pilot 분사량에 따른 Soot의 분포특성

파일럿 분사시 Soot의 형태와 분포특성을 알아보기 위하여 분사량과 분사시기에 따라서 연소에 미치는 분사량과 분사시기에 따라서 연소에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

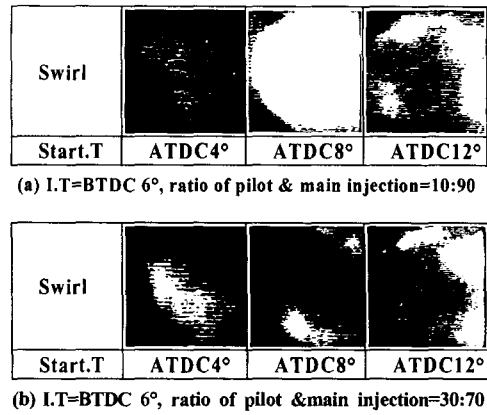


Fig. 11 Comparison of soot formation with injection quantity

파일럿 분사와 메인분사의 분사량 비율에 따른 Soot 분포특성을 측정하여 그림 11에 비교하였다.

분사압은 1000bar일 때의 촬영 사진결과 이다. 이 결과 그림으로부터 분사량 비가 30:70의 경우가 10:90의 경우보다 Soot에 의한 LII의 신호가 소량으로 검출되고 있음을 알 수가 있다. 이는 분사량 10:90일 경우보다 30:70의 분사량일 때 Soot의 형성이 작아짐을 의미하는 결과이다. 이러한 현상은 파일럿 분사량이 많아질수록 그림 7에서 나타난 바와 같이 확산연소 구간이 단축되므로 연료가 충분히 혼합되어서 Soot의 생성이 억제되었기 때문이라고 판단된다.

3.3.3 분사압력에 따른 Soot의 시간별 형성과정

그림 12는 분사압에 따른 Soot의 형성과정을 시간별로 나타내었다.

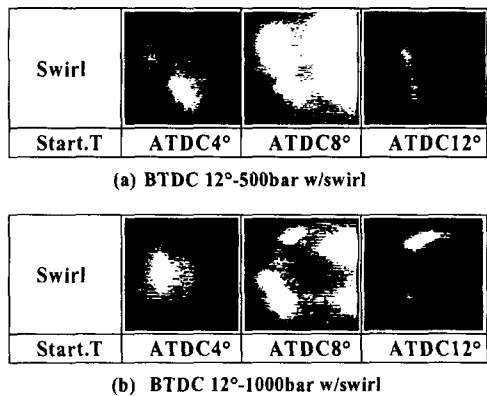


Fig. 12 Comparison of soot formation with injection pressure

분사압이 높을 경우 Soot의 발생분포 및 강도가 감소함을 알 수가 있다. 이러한 현상은 연료의 미립화가 촉진되어 연소의 혼합상태가 개선되기 때문으로 판단된다. 또한 ATDC12°의 경우에는 연료의 미립화로 인해서 압력이 낮은 경우보다 연소가 활발하게 이루어지므로 상대적으로 soot의 발생분포 및 강도가 높게 나온 것으로 판단되나 이러한 문제는 차후 신중하게 검토되어야 할 문제라 판단된다.

4. 결 론

위와 같은 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 커먼레일식 인젝터를 장착한 가시화 엔진에 흡기 포트 형상을 변경한 헤드를 장착하여 각각의 분사 시기, 분사압력, 스웰유동 변화에 따라서 Soot측정 및 연소해석을 할 수가 있었다.
- 2) 파일럿 분사압력이 증가할수록 최대 열발생율이 증가하고 착화시기가 빨라지는 경향을 보였다. 또한 분사시기에 따른 soot 분포형성과정은 파일럿 분사와 단일분사와는 다르다는 것을 알 수 있었다.
- 3) 파일럿 분사의 경우 파일럿 분사가 많은 경우에 연료와 공기의 혼합이 용이하므로 soot의 형성이 작아지는 현상을 관찰할 수 있었다.
- 4) 파일럿 분사량에 따라서 연소가 잘 이루어지는 지점에서 Soot가 소량으로 생성되었고, 분사압력을 높일수록 Soot는 줄어드는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적 기초 연구과제 (R01-2000-000-0303-0)의 지원으로 수행된 연구로, 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) N. Hikosaka, "A View of the of Automotive Diesel Engines," SAE 972682, 1997.
- 2) M. Badami, F. Millo, D. D'Amato, P. Nuccio, S. Canale, "Experimental Investigation on Soot and NOx Formation in a Di Common- Rail Diesel Engine With Pilot Injection," SAE 2001-01-0657, 2001.
- 3) M. Bakenhus, R. D. Reitz, "Two-Color Combustion Visualization of Single and Split Injections in a Single-Cylinder, Heavy-Duty D.I.Diesel Engine Using An Endoscope-Based Imaging System," SAE 1999-01-1112, 1999.
- 4) D. A. Nehmer, R. D. Reitz, "Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and NOx Emissions," SAE 940668, 1994.
- 5) G. J. Smallwood, D. R. Snelling, W. S. Neill, F. Liu, W. D. Bachalo, Ö. L. Gülder, "Laser-Induced Incandescence Measurements of Particulate Matter Emissions in the Exhaust of a Diesel Engine," Comodia 2001, pp.613-621, 2001.
- 6) J. Kawashima, H. Ogawa, Y. Tsuru, "Research on a Variable Swirl Intake Port for 4-Valve, High-Speed Di Diesel Engines," SAE 982680, 1998.
- 7) S. J. Kim, J. W. Jeong, K. H. Lee, M. H. Sunwoo, "A Study on the Spray Combustion Characteristics in a Cylinder of a D.I.Diesel Engine with the Electrically Controlled Injector," Transactions of KSAE, Vol.8, No.2, pp.50-56, 2000.
- 8) J. W. Jeong, K. H. Lee, C. S. Lee, "A Study on the Effects of Swirl Flow of the D. I. Diesel Engine Generated by SCV on the Combustion Characteristics," Transactions of KSAE, Vol. 10, No.2, pp.31-39, 2002.