

고압분사 시 연료분무 특성에 관한 연구

Fuel Spray Characteristics in the High Pressure Injection Process

안재현* · 김형모** · 신명철*** · 김세원***

J. H. Ahn, H. M. Kim, M. C. Shin and S. W. Kim

Abstract

Constant volume combustion chamber has been designed to investigate diesel spray characteristics with Common-Rail injection system to realize high pressure injection. In this study, two methods of measurements, Schlieren shadowgraphy and Mie scattering imaging method are applied experimentally to study spray form and liquid phase zone in high pressure, high temperature conditions. Diesel fuel is injected at the point which ignited mixture gas is completely burned. The effect of injection pressure, injector hole diameter, ambient gas temperature and density are investigated experimentally.

주요기술용어: Constant Volume Combustion Chamber(정적연소기), Common-Rail Injection System(컴먼레일분사장치), Diesel Spray(디젤 분무), Spray Penetration (분무길이), Intact Core Length(액주길이)

1. 서론

최근의 내연기관 연소과정의 향상은 그 성능향상 뿐만 아니라 근래의 엄격해진 배출가스 규제에 발맞추어 연구가 지속되고 있다. 특히 디젤기관은 고효율의 열기관이나 soot, NOx, HC 등의 유해물질이 과다 배출됨에 따라 이러한 배출가스의 감소를 위하여 배기가스 재순환(EGR)이나 공연비의 증대, 고압분사, 분사시기 및 분사 기간 조절 그리고 기타 후처리 등 많은 방법으로 국내외의 연구기관에서 활발히 연

구가 진행 중이다.

본 연구에서는 고압시의 분무특성에 관한 연구를 수행하기 위하여 Common-rail 방식을 채택하였다. Hiroyasu등⁽¹⁾은 연료의 분사압력을 높임으로써 연료-공기의 혼합을 향상시키는데 효과가 있다는 것을 발표했고 Greeves등⁽²⁾에 의한 실험적 결과는 연료의 경제성과 배출가스가 높은 분사압력을 사용함으로써 향상될 수 있다는 것을 보여주었다. 또한 이 system은 국외관련 회사들의 개발로 이러한 방식이 채택된 차량이 이미 양산되고 있다.

Browne등⁽³⁾⁽⁴⁾은 디젤 분무의 발달하는 과정은 주변 밀도, 온도, 분사압력 그리고 노즐의 형상에 따라 크게 영향을 받게 되며, 분무의 침투길이를 조사함으로써 미립화 영향을 관찰하였다. 또, 분무의 액체 상태로써의 발달과정은 디젤기관, 특히 작은 보어의 직분식 디젤기관에 있어 실린더 내부의 연소과정을 최적화 하는 면에 있어서 매우 중요한 issue가 되고 있

* 한양대학교 기계공학과 대학원

** 한국항공우주연구원

*** 한국생산기술연구원

다. Dennis 등⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾은 실린더 내부의 조건이 분무의 액주의 길이에 영향을 미치는 경향에 대해 연구하였다. 액체상태의 길이는 연료와 공기의 혼합을 향상을 연구하는데 필요할 뿐만 아니라 기관의 설계에도 반드시 필요한 자료이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 정적 연소기

정적연소기의 주요장치는 Fig. 1과 같고 전체크기는 220×220×220mm이며 연소기의 내부는 완전 큐빅(120×120×120mm)의 형상을 갖고 있다. 이 형상은 전 6면이며 총 3개의 Quartz 창(Φ80mm×t2 in)과 인젝터, 각종 센서 장착시 위치를 가변 조정 가능하도록 제작되었다.

2.1.2 분사장치

본 실험에 사용된 Common-rail Injector의 노즐은 단공이며 분공경은 0.22, 0.3, 0.4mm의 크기를 사용하였으며 L/D는 각각 3.6, 2.6, 2이다. 인젝터에 관한 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

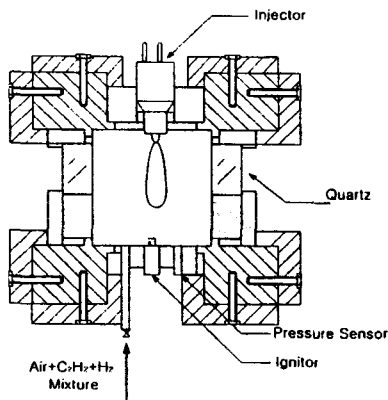


Fig. 1 Schematic of constant volume combustion chamber

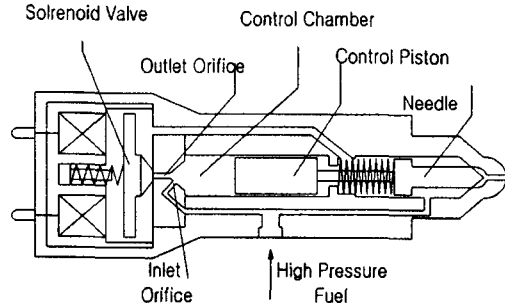
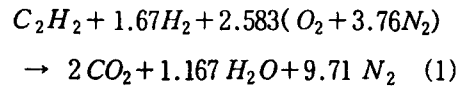


Fig. 2 Common rail injector

2.2 실험방법

동기신호를 Digital delay pulse generator (Stanford Research System, INC., DG535)를 통해 초기 trigger신호를 고속카메라와 점화장치에 연결되는 Power TR로 보내면 약 0.1sec 후 점화가 시작된다. 점화장치는 Power Transistor를 이용하여 5V Trigger신호에 전류(12V 30A)가 흐를 수 있도록 구성하였으며 차량용 Ignitor를 장착하였다. 초기 혼합되는 혼합기의 연료는 아세틸렌과 수소 및 공기의 조합으로 이루어져 있고 그 반응식은 아세틸렌 1몰을 가정할 때 (1)과 같다.



완전히 연소가 끝났다고 여겨지는 충분한 시간(1.6sec)후에 Injection Control Driver에 다시 Triggering하여 약 3ms의 기간으로 연료의 분사를 시작하도록 하였다. Fig. 3에 나타낸 그래프는 초기 혼합기의 압력을 4, 6, 8kg/cm²(case 1, 2, 3)으로 설정하고 연소시켜 내부의 압력과 injection trigger를 표시한 것이다. 또한, 분사 시간과 분무주변 조건을 Table. 1에 나타내었다.

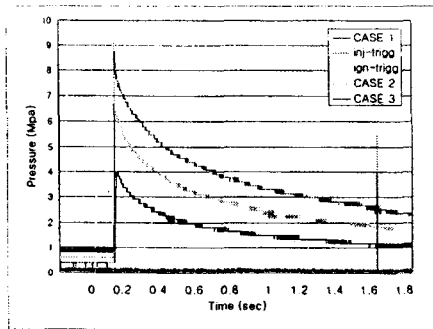


Fig. 3 Cylinder pressure and injection timing history for each CASE.

Table. 1 Three ambient gas conditions.

	CASE 1	CASE 2	CASE 3
Density (kg/m ³)	4.33	6.49	8.66
Temperature (K)	745.6	894.7	932
Injection Timing(sec)	1.6	1.6	1.6
Injection Delay(ms)	0.1	0.1	0.1

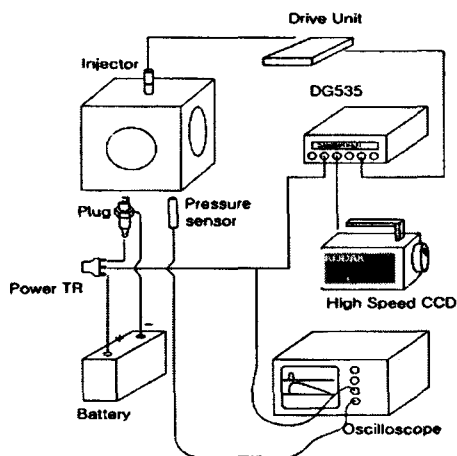


Fig. 4 Schematic diagram of experimental set up

화상데이터는 디지털 고속 카메라(미국 Kodak의 ExktraPro 4540mx)를 이용하였으며 실험 신호 구성도 및 데이터 취득도를 Fig. 4에 도시하였다.

2.2.1 Schlieren-Shadow Graphy

분무의 성장 패턴과 기상 및 액상모두를 포함한 분무의 이미지를 얻기 위하여 Fig. 5와 같이 장치를 구성하였다. 할로겐 램프 및 컨트롤러(VTEC제품)를 이용하여 핀홀로 초점을 형성하고 200mm직경의 슈리렌 미러를 통과시킴으로써 방향상으로 균일하고 일정한 밀도의 광원을 형성한다. 이 광도를 수십번의 Calibration 작업을 통하여 조절하면, 분무의 액상영역은 투과를 하지 못하고 기상부분만 투과를 하게되는 이미지를 얻을 수 있다. 분무를 투과하지 못한 광은 다시 나이프 에지를 통해 선명도를 유지하며 웨도우 그래프로써 고속카메라에 기록되게 된다.

2.2.2 Liquid Core Length의 측정

분무의 액상상태의 영역만을 취득하기 위하여 Fig. 6과 같이 Mie scattering기법을 이용하였다. 광원은 Ar-Ion Laser에서 514nm파장의 빛을 사용하였으며 분무를 직접광원에 노출시키면 광원의 직진성과 관측창의 형상의 문제로 인하여 하류 부근 분무의 형상을 모두 얻어 낼 수 없고 초기에 카메라의 초점거리 계산문제 등을 해결하기 위하여 Chamber내부로 레이저 광이 도달하기 전에 Light Diffuser로써 광을 챔버 내부에서 모두 산란시키고 분무에 부딪혀서 scattering된 이미지를 514nm 필터를 이용하여 필터링 된 상을 카메라를 이용하여 얻었다. 이후 저장된 이미지는 액주의 팁 끝 부분이 break-up과정에 의하여 불분명하게 나타나므로 image intensity의 Threshold값을 적용시켜 각각의 이미지를 변환시켰다.

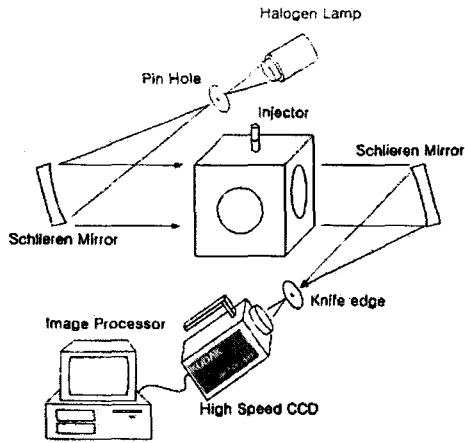


Fig. 5 Arrangement of schlieren shadow graph system.

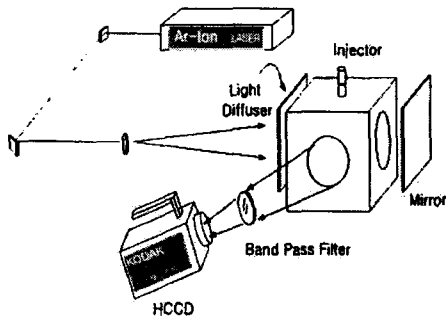


Fig. 6 Arrangement of Mie scattering imaging method system.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Spray Penetration

Fig. 7은 주변밀도가 23.22kg/m³로 일정하고 각각 분공경이 일정한 경우에 대하여 분사압력이 각각 70, 100, 120 Mpa일 때의 계측결과이다. 그래프의 전반적으로 특정 값의 1/2승에 비례하는 경향을 나타내고 있으며 분사압력이 증가할수록 분무의 성장이 빨라지는 것을 알 수 있다. 동일 조건에서 분사압력의 증가는 연료의 운동에너지의 증가를 가져오게 되며 따라서 분출되는 연료의 속도는 빨라지게 된다.

Fig. 8에서는 동일한 분사압력과 분공경에

대하여 주변 개스의 밀도를 변화시켰을 때의 결과이다. 그래프에서 주변 밀도가 증가하는 경우, 분무의 성장이 느려지고 있으며 주변 개스 밀도가 낮을 때는 거의 직선형에 가까우며 분사초기에는 밀도가 점차 증가할수록 더욱 곡선화 되고있음을 알 수 있다. 이것은 분출되는 연료가 주변의 개스와 충돌하면서 분무의 속도는 현격하게 떨어지고 그 운동에너지는 액적의 분열(droplet break-up), 증발등의 에너지에 큰 영향을 미치게 된다. 그림에서 보는 것과 같이 어떠한 다른 조건에 비하여 분무의 성장이 주변 밀도에 따라 매우 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

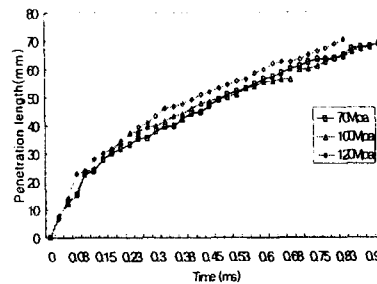


Fig. 7 Spray penetration for injection pressures ($d_o = 0.22\text{mm}$, $\rho_a = 23.22\text{kg/m}^3$)

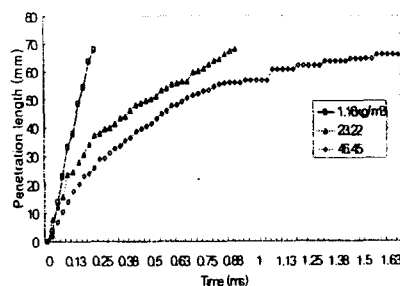


Fig. 8 Spray penetration for three ambient densities ($P_{inj} = 100\text{Mpa}$, $d_o = 0.22$).

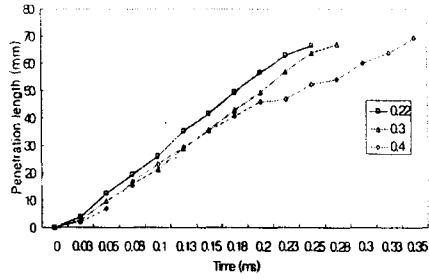


Fig. 9 Spray penetration for three nozzle diameters ($P_{inj}=70\text{Mpa}$, $\rho_a=1.16\text{kg/m}^3$).

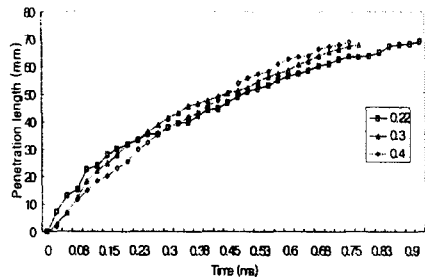


Fig. 10 Spray penetration for three nozzle diameters ($P_{inj}=70\text{Mpa}$, $\rho_a=23.22\text{kg/m}^3$).

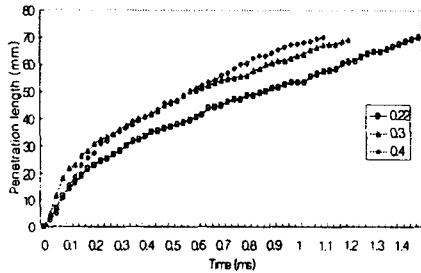


Fig. 11 Spray penetration for three nozzle diameters ($P_{inj}=70\text{Mpa}$, $\rho_a=46.45\text{kg/m}^3$).

3.2 슈리렌 계측

일반적으로 분무의 vaporize되는 과정은 분무 팁의 하류방향으로의 전개를 거쳐 주변의 hot 개스들과 충돌하고 break-up을 거친 후 주변의 개스들과 활발히 mixing되면서 증발하는 과정을 갖는다.

Fig. 12에서는 스프레이의 발달과정을 잘 보여 주고 있으며 주변의 화염처럼 밝고 회백색

의 바탕은 배출 개스의 슈리렌 이미지에 의한 빛의 밀도차에 의한 현상이다. 고속 카메라의 분해능은 40000frame/sec이지만 높은 프레임으로 갈수록 pixel이 작아져서 화상이 나빠지므로 프레임 당 1/13500(sec)으로 구성한 것이며 밝은 부분의 실제 지름은 70mm이다.

주변 개스의 온도와 밀도가 CASE들중 가장 높은 값을 가지는 경우이므로 분무팁의 진행속도가 Fig 13의 CASE 2 와 비교해 볼 때 느리며 분무의 검게 나타난 부분은 액적군들의 밀도가 높은 부분으로써 이는 후의 Mie scattering에 의한 액주의 영역과 거의 흡사한 경향을 나타낸다. CASE 2에 비하여 CASE 3의 고온 고압의 경우는 보다 액주의 길이가 짧고 상대적으로 증발하는 액적의 양이 많다.

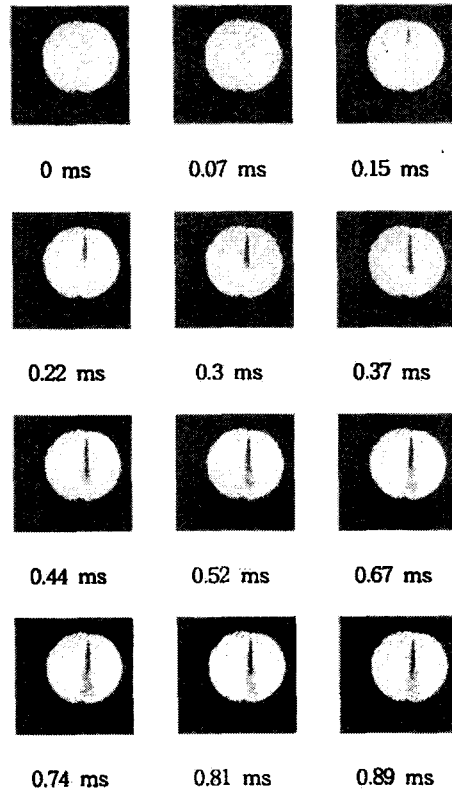


Fig. 12 Schlieren image of instantaneous fuel spray ($P_{inj}=70\text{Mpa}$, $d_o=0.22$, CASE 1)

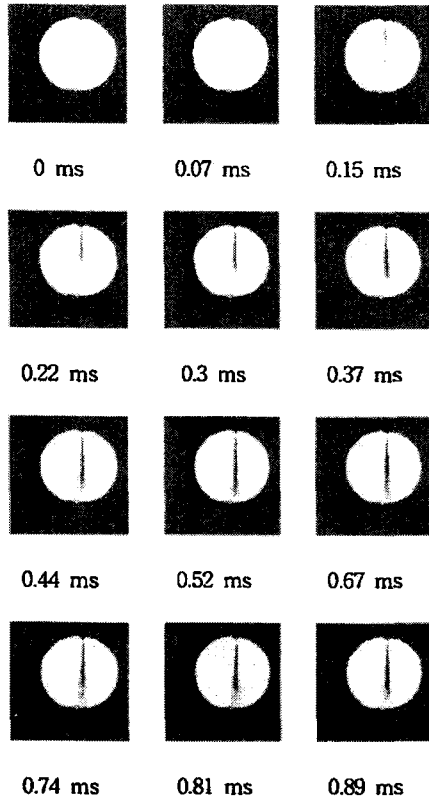


Fig. 13 Schlieren image of instantaneous fuel spray (Pinj=70Mpa, $d_o=0.22$, CASE2)

Fig. 12과 Fig. 14의 비교는 동일한 환경에서 단지 분사 압력만의 차이를 갖는 경우이다. 같은 3msec의 분사기간을 가지므로 Fig. 14의 경우는 분사량은 더욱 많고 분무 팁의 도달 속도가 더 빠른 반면, 검게 나타난 액주 영역의 길이방향의 위치와 크기는 거의 비슷한 점을 볼 수 있다. 따라서 분무의 분사압의 변화는 액주 상태를 변동시키지 않으면서 더 많은 양의 증발성향을 예측 할 수 있다.

Fig 14과 Fig 15의 비교에 있어서는 동일 조건에서 분공경이 증가했을 경우이다. 분공경이 커졌을 경우가 액주 상태의 영역이 더욱 커지고 같은 분사기간동안 더 많은 양의 연료를 분무하므로 운동량이 더욱 커서 분무 팁 속도가 더욱 빠르다. 하지만 이 경우는 앞의 분사 압

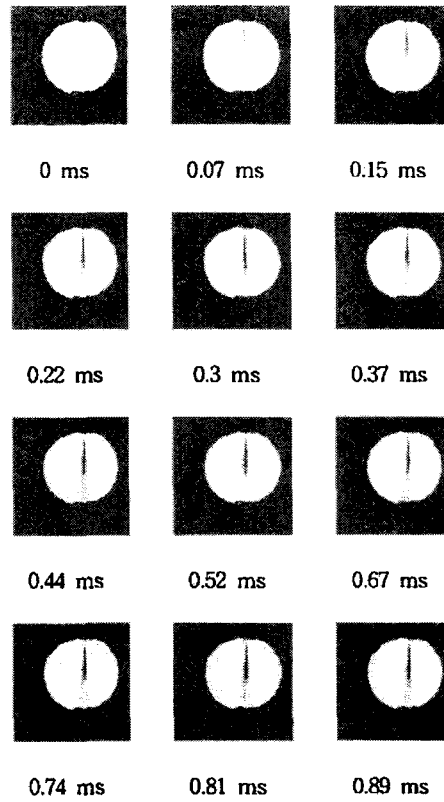


Fig. 14 Schlieren image of instantaneous fuel spray (Pinj= 120Mpa, $d_o=0.22$, CASE 3)

이 변했을 때와는 달리 분사량이 늘었다고 하더라도 액주의 영역을 그대로 보존하지 못하는 것을 알 수 있다.

3.3 분무의 액주길이

분무에 scattering이 일어난 후 514nm 필터링하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 16에서 Fig. 18까지는 특정 분사압력으로 각 노즐별로 주변 개스의 밀도와 온도를 변화시킨 경우를 나타내었다. 주변의 온도와 밀도가 증가할수록 분무의 액주의 길이는 짧아지는 것을 보여 주고 있으며, 노즐 홀이 작은 것일 수록 그 영향이 크게 나타나고 있다. 이것은 슈리렌 이미지 기법에 의한 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 19는 노즐의 형상

과 각각의 CASE를 일정하게 하면서 분사압력을 변화시킨 경우이다. 여기서는 액주의 길이에 대한 본 연구에서 정의한 조건들은 분사압력이 변하더라도 거의 아무런 영향도 주고 있지 않다는 것을 알 수 있다.

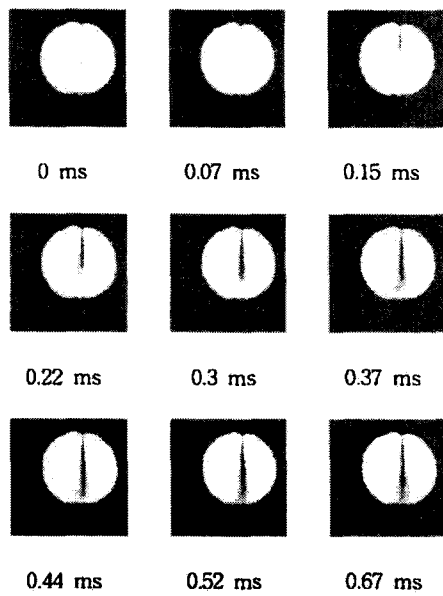


Fig. 15 Schlieren image of instantaneous fuel spray (Pinj.= 120Mpa, $d_o=0.3$, CASE 3).

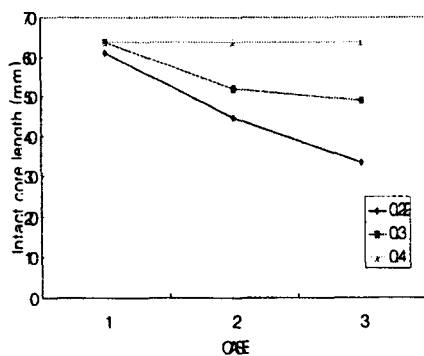


Fig. 16 Intact core length(Pinj.=70Mpa)

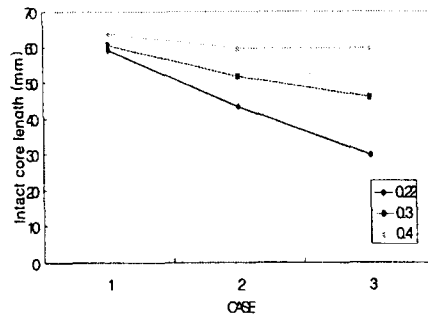


Fig. 17 Intact core length(Pinj.= 100Mpa)

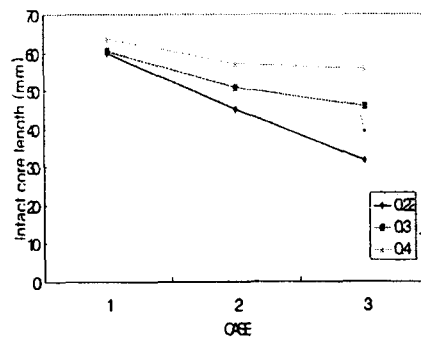


Fig. 18 Intact core length(Pinj.= 120Mpa)

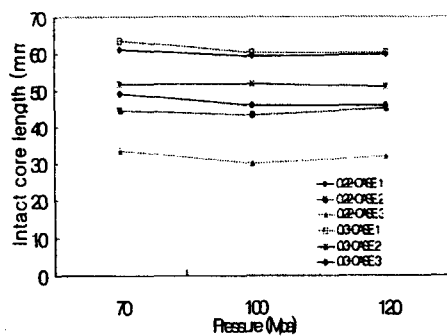


Fig. 19 Effects of injection pressures on intact core length in several spray conditions.

4. 결론

- 1) 연소열과 압력을 이용한 정적 연소기와 고압 정밀 분사를 위한 common-rail Injection system을 구축하였다.
- 2) 주변 기체의 밀도와 온도가 높으면 분무의 발달 속도가 현저히 늦고 액상의 영역은 작아지고 기상영역이 커진다.
- 3) 분무의 액상영역은 분무초기에 노즐의 입구에서부터 시작하여 축방향 하류로 발달하며 액상에서 기상이 되는 비율이 일정한 위치에서 성장이 고정되며 그 액상영역의 tip(끝단)부분까지의 길이(액주길이)는 길이방향 및 반경 방향으로 약간의 진동이 있다.
- 4) 노즐의 분공경이 커질수록 분무의 발달 속도는 미소하게 커지나 분무의 작은 성장하며 분공경이 작을수록 연료의 미립화 성향이 높고 액상영역은 줄어들며 증발되는 연료의 양은 더욱 많아진다.
- 5) 분사 초기에 노즐의 분공경이 크고 주변 밀도가 작은 조건에서 분공경이 작은 경우보다 분무의 성장속도가 작아졌다가 다시 증가하는 경향이 발생한다.
- 6) 분사 압력이 높아질수록 분무의 발달 속도는 더 빨라지고 발달한 액상 기상 영역의 변화는 없으며 같은 분사 기간일 때 분사압력이 클수록 증발되는 연료량은 더 크다.
- 7) Mie scattering 이미지 기법은 슈리렌 기법에 의한 결과와 잘 일치하며 분사압이 증가에 대하여 본 연구에서 정의한 조건상에서 액주 길이의 변화는 거의 없으며 주변 밀도와 온도가 높을수록 액주의 길이는 줄어든다. 또한 분공경이 작을수록 액주의 길이가 짧아지는 경향은 더욱 커진다.

참고문헌

1. Hiroyasu, H., and Arai, M., Structure of Fuel Sprays in Diesel Engines, SAE paper 900475, 1990.
2. Greeves, G., and Tullis, S., Contribution of EUI-200 and Quiescent Combustion System Towards US94 Emissions, SAE paper 930274, 1993.
3. 강필중, 김형모, RCM을 이용한 디젤분무거동 및 자발화 특성에 관한 논문, 춘계학술대회, 대한기계학회, 2000.
4. Browne, K. R., Partridge, I. M., and Greeves, G., Fuel Property Effects on Fuel/Air Mixing in an Experimental Diesel Engine, SAE paper 860223.
5. Kamimoto, T., Yokota, H. and Koba yashi, H., Effect of High Pressure Injection on Soot Formation Processes in a Rapid Flames, transaction of the SAE, Vol. 96, Compression Machine to Simulate Diesel Sect. 4, pp.4783-4791, 1987.
6. Hodges, J. T., Baritaud, T. A., and Heinze, T. A., Planar Liquid and Gas Fuel and droplet Size Visualization in a DI Diesel Engine, Transaction of the SAE, Vol. 100, Sect. 3, pp.1284-1302, 1991.
7. Dennis L. Siebers, Liquid-Phase Fuel Penetration in Diesel Sprays, SAE paper 980809, 1998.