

# 연료 분무 및 연소 가시화 연구를 위한 고온 고압 정적 연소실 개발

## Development of High Pressure & Temperature Constant Volume Chamber for Visualization Study of Fuel Spray and Combustion

김기현\*†  
Kihyun Kim\*†

(Received 02 November 2016, Revision received 16 June 2017, Accepted 16 June 2017)

**Abstract:** Diesel and gasoline engines will be used as main power system of automobiles. Recently, engine downsizing is widely applied to both gasoline and diesel engines in order to improve fuel economy and exhaust emissions. Engine downsizing means small engine combustion chamber with higher combustion pressure. Therefore, spray and combustion process should be investigated under these high pressure and temperature conditions. In this study, constant volume combustion chamber which enables easy optical access from six directions was developed. Combustion chamber was designed to resist maximum pressure of 15 MPa and maximum temperature of 2,000 K. Combustible pre-mixed mixture was introduced into combustion chamber and ignited by spark plugs. High pressure and temperature were implemented by combustion of pre-mixed mixture. Three initial conditions of different pressure and density were tested. High repeatability of combustion process was implemented which was proven by low standard deviation of combustion pressure.

**Key Words :** Constant volume chamber, Combustion, Shadowgraph, Visualization

### 1. 서 론

디젤 엔진과 가솔린 엔진은 높은 효율과 시장성 등 여러 요인으로 인해 자동차 및 수송기관의 주 동력원으로 사용되고 있다.<sup>1)</sup> 각 엔진의 배기가스 규제는 날로 강화되고 있으며, 소비자의 요구에 따라 연비를 개선하고자 하는 노력이 계속되고 있다. 연비와 배기가스 개선 기술의 핵심인 연료 분사 최적화 기술, 연소 최적화 기술을 발전시키기 위해서는 연료 분무와 연소 과정에 대한 물

리적 분석이 필요하다. 최근 엔진의 다운사이징이 가속화됨에 따라<sup>2)</sup> 연소실 압력은 계속해서 증가하고 있으며, 고온 고압 연소실 조건에서 연료 분무와 연소 과정에 대한 실험적 연구가 중요해지고 있다.

이에 따라, Pickett 등은 실제 디젤 엔진에서 연료가 분사되는 약 50 bar 이상, 1,000 K 근방에서 실제 연료 분무의 발달과정과 연소과정을 연계하여 분석하는 등의 연구를 수행한 바 있으며, 이를 위해 고온 고압 조건의 모사가 가능한 정적 연

\*† 김기현(교신저자) : 신라대학교 융합기계공학부  
E-mail : khkim3@silla.ac.kr, Tel : 051-999-6925

\*† Kihyun Kim (corresponding author) : College of MICT  
Convergence Engineering, Silla University.  
E-mail : khkim3@silla.ac.kr, Tel : 051-999-6925

소실을 구현하였다.<sup>3)</sup>

본 연구에서는 이와 같이, 고온 고압 조건을 모사할 수 있고, 연료 분무와 연소과정을 다양한 각도에서 가시화 할 수 있는 정적 연소실의 개발 과정을 소개하고자 한다.

## 2. 정적 연소실 제원

Table 1 Specification of constant volume chamber

Parameter	Value
Material	SM45C
Shape	Cube
Maximum pressure & temperature	150 bar, 2000 K
Optical window	5
Optical window material	Quartz
Maximum injection pressure	2500 bar

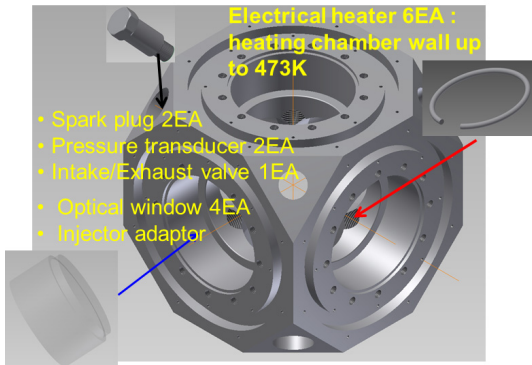


Fig. 1 Body of the constant volume chamber

정적 연소실의 주 재료는 표면 경도가 높고 풀림열처리를 통해 충격과 진동에 강하여 기계구조용 강으로 널리 사용되는 SM45C를 사용하였다.<sup>4)</sup> 분사기가 설치되는 측면을 제외하고, 최대 5개의 퀴즈 창을 통하여 챔버 내부를 가시화 할 수 있도록 설계하였다.

Table 1은 정적연소실의 제원을 나타내며, Fig. 1에 정적 연소실의 구성 요소를 나타냈다. 정육면체 구조에서 5개의 면에 가시화 창을, 나머지 한 면에는 연료 분사기 어댑터를 설치할 수 있다. 정적 연소실의 8개 꼭지점 부분을 모따기 한 후, 홀

을 가공하여 스파크 플러그, 열전대, 그리고 흡배기 밸브 등을 설치할 수 있도록 하였다. 연소실의 각 면에는 U자 모양의 홀을 가공하여 정격 출력 2 kW급 전기 히터를 설치하였다. 벽면에 전기히터를 설치하는 이유는 정적 연소실 벽면을 가열하여 예혼합기의 완전 연소를 돕기 위함이다. 전기 히터는 정적 연소실의 벽면 온도를 약 550 K까지 상승시킬 수 있다. 연소실의 위아래 벽면에 1개씩 열전대를 설치하여 연소실 벽면의 온도를 관찰할 수 있도록 하였다.

위와 같은 정적 연소실은 가로 세로 800 mm, 두께 20 mm의 SM45C 판으로부터 200 mm 상부에 설치되었으며, 알루미늄 프로파일을 사용하여 전체 시스템의 지지대를 구성하였다.

## 3. 정적 연소실 시스템 구성

### 3.1 예혼합기 형성 및 흡기 시스템

Fig. 2에는 정적 연소실 전체 시스템의 개요도를 나타내었다. 정적 연소실 시스템은 크게 예혼합 가스 준비 시스템, 정적 연소실, 점화 시스템, 흡배기 가스 배관, 안전 장치 등으로 구성된다. 먼저 예혼합 가스 준비 시스템에서는 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>(아세틸렌), 수소(H<sub>2</sub>), 산소(O<sub>2</sub>), 질소(N<sub>2</sub>) 등 네 가지 가스를 예혼합 챔버 (premixing chamber)에 일정한 비율로 유입한다. 이때, 오차범위 0.5 mbar 수준의 압력센서를 사용하여 기체의 분압 조절을 통해 분율을 조성을 맞춘다. 이후, 예혼합 챔버에 장착되어 있는 혼합 교반기를 사용하여 예혼합기를 충분히 균질하게 혼합한다. 이때, 가스의 조성은 예혼합 가스가 완전 연소된다고 가정할 시에, 생성물의 산소 목표 농도를 맞출 수 있도록 결정한다. 완전 연소된 후에 연소실 내에 연료를 분사하여 연소 시험을 할 경우, 산소 농도는 연소에 중요한 인자가 되므로 산소농도를 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다. 따라서 완전 연소를 달성하는 것은 매우 중요하므로, 연소실 벽면을 충분히 예열한 후에 연소가 발생하도록 한다. 사용자의 연구 목적에 따라 최종 연소 생성물의 산소농도를 0~25%까지 자유롭게 맞출 수 있다.

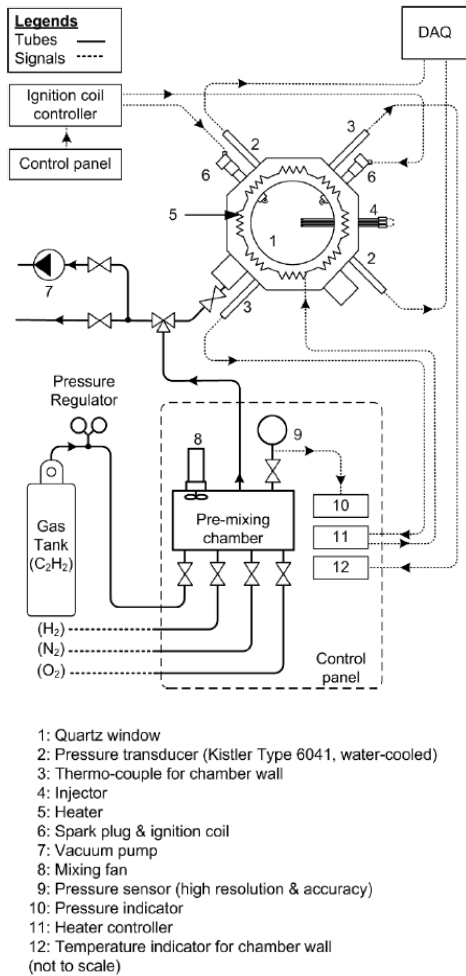


Fig. 2 Schematic diagram of constant volume chamber system

예혼합 챔버에서 혼합되어 준비된 가스를 흡기 배관을 통해 정적 연소실에 유입시킨다. 흡기 라인에는 1 m 간격으로 체크밸브와 역화 방지 밸브가 설치되어 있어, 예혼합 챔버로의 역류 및 역화를 방지한다. 목표 유입량의 예혼합 가스가 정적 연소실로 유입되면 정적 연소실로 연결된 흡기 라인의 밸브를 잠근다. 가스의 목표 유입량은 정적 연소실의 압력과 온도를 상시 모니터링하고 있으므로, 이로부터 정적 연소실로 유입되는 가스의 밀도를 계산하여, 목표 밀도가 맞춰지면 밸브를 폐쇄한다. 밸브는 가스 연소 발생 시 연소된

가스가 직접적으로 밸브에 접하게 되므로, 최대 200 bar 이상의 압력을 견딜 수 있는 밸브를 설치해야 한다.

### 3.2 정적 연소실의 연소 시스템 구성

정적연소실의 내부에는 2개의 spark plug가 대각 방향으로 설치되었다. 이는 연소실의 위쪽과 아래쪽면에 설치되어 있으며, 연소가 발생할 시에 양쪽에서 화염 전파를 개시하여 연소를 짧은 시간 내에 이루어지게 하고, 연소실 내 상하부의 온도차를 최소화 하기 위함이다. 또한 내부의 압력을 실시간으로 측정할 수 있는 수냉식 압력 센서 (Kistler, 6052A)를 설치하였다. 연소실 벽면의 온도를 감지하기 위해 벽면에 k-type의 열전대가 설치되며, 내부 공기 온도를 측정하기 위해 연소실 내부로 노출형 열전대가 설치되었다.

유입된 예혼합가스의 완전 연소를 촉진하기 위하여, 연소실 벽면의 온도를 473 K로 가열하였다.

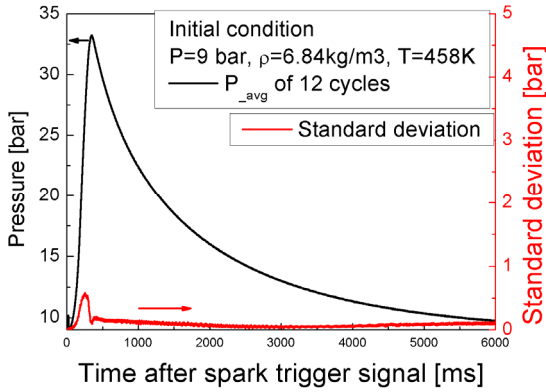
예혼합기의 유입이 완료되면, 예혼합기 성분에 따른 밀도차이로 인한 가스 성분층의 분리가 이루어지지 않도록, 연소실 내부로 돌출된 믹싱팬이 가동된다. 믹싱팬은 연소실 상부 벽면에 설치되며, 길이가 25 mm의 사각형 날개 5개가 수평면 기준 30° 각도로 일정한 간격으로 조립된 구조이다. 믹싱팬은 자기력에 의해 구동되어 연소실 외부와는 완전히 격리되어 있으므로 믹싱팬 축을 통한 연소실 외부로의 가스의 누설 염려는 없다.

## 4. 연소 실험 결과 및 고찰

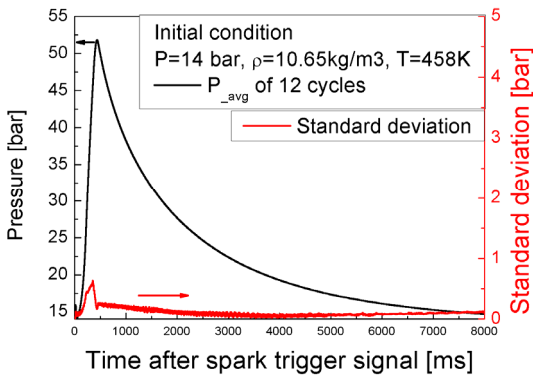
### 4.1 초기 조건에 따른 연소 압력 변화

스파크 플러그 컨트롤러에 의해 두 개의 스파크 플러그로부터 점화가 시작되면 스파크 플러그로부터 화염 전파에 따라 예혼합기의 연소과정이 개시되고, 연소실 내부 압력과 온도는 급격히 상승한다.

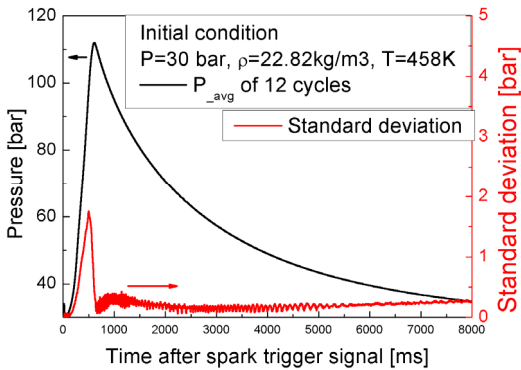
본 연구에서는 정적 연소실 내 예혼합기의 초기 상태 조건에 따른 연소 특성의 차이점을 살펴 보기 위하여, 총 세 가지 초기 상태 조건에서 예혼합기의 연소 시험을 수행하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Pressure trace and standard deviation of pressure trace after spark trigger in constant volume combustion chamber

$$\begin{aligned} \rho &= 6.84 \text{ kg/m}^3, P = 0.9 \text{ MPa}, T = 458 \text{ K} \\ \rho &= 10.65 \text{ kg/m}^3, P = 1.4 \text{ MPa}, T = 458 \text{ K} \\ \rho &= 22.82 \text{ kg/m}^3, P = 3.0 \text{ MPa}, T = 458 \text{ K} \end{aligned}$$

벽면의 예열 온도에 따라 예혼합기의 온도는 458 K에 고정되었으며, 밀도의 차이에 따라 기체 방정식에 따라 압력을 계산하였다. 세 가지 조건 모두 예혼합기의 기체 농도는 예혼합기가 완전 연소한다고 가정했을 때 연소 생성물의 산소농도가 0%가 되도록 예혼합기를 구성하였다. 예혼합기의 가스 농도는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} C_2H_2 &= 3.2\%, H_2 = 0.5\%, \\ O_2 &= 8.25\%, N_2 = 88.05\% \end{aligned}$$

아세틸렌은 연소를 위한 주요 연료로 사용되었으며 완전 연소 및 연소 속도를 촉진하기 위하여 미량의 수소가 사용되었다.

Fig. 3은 정적 연소실 내부를 위의 세 가지 초기 조건에 따라 예혼합기를 채워 연소할 때, 연소실 내부의 압력 변화를 나타낸다. x축은 스파크 플러그에 스파크 신호를 인가한 시점을 기점으로 진행 시간을 나타내며, y축은 연소실 내부 압력을 나타낸다.

각각의 예혼합기 조건에서 연소를 총 12번 수행하여, 압력 곡선의 평균과 표준편차를 함께 나타내었다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이, 스파크 인가 후 연소로 인한 급격한 압력 상승이 초기에 발생한다. 이때 연소실 내의 초기 압력이 높을수록, 즉 예혼합기의 밀도가 높을수록 연소에 참여하는 연료량이 많고 연소 기간이 길어지게 되므로 최고 연소압에 도달되는 시간은 길어지고 최고 압력값은 증가한다. 최대 압력에 도달하는 시점은 초기 조건(9, 14, 30 bar)에 따라 각각 330 ms, 425 ms, 630 ms로 나타났으며, 연료량 증가 대비 최고 압력에 이르는 시점이 더 짧아짐으로써 연소 속도가 더 증가하였음을 알 수 있고, 이는 초기 높은 압력 조건하에서 화학반응이 더 촉진되었다고 판단된다.

연소 과정에 의해 최대 압력에 도달한 이후, 연소실 벽면을 통한 열전달로 인하여 주변으로의 열손실이 발생하기 때문에 혼합기의 온도가 하락하고, 이에 따라 압력도 하락한다. 열전달로 인한 열손실에 따른 압력 하강 과정은 연소 압력 상승

과정보다 상대적으로 느리게 발생한다. 압력이 하락하는 도중, 연구자가 모사하고자 하는 분위기 압력 및 온도 지점에 다다른 순간, 데이터 수집 장비와 트리거 발생장치에 의하여 연료 인젝터를 동기화 함으로써 연소실 내부에 연료를 분사하며, 조명 및 카메라를 동기화 하여 연료 분무 및 연소 가시화 작업을 수행한다.

12번 반복 실험의 압력 곡선 표준편차 특성에서 확인할 수 있듯이, 최대 표준 편차는 세가지 초기 상태 조건에서 각각 0.05, 0.1, 0.2 MPa 이하이며, 이는 전체 압력 기준 약 2% 이내 수준의 오차로써, 연소 시험의 충분한 반복성이 확보되었음을 알 수 있다. 이는 열역학적으로 초기 상태조건과 주변 환경 조건이 일정하게 유지되었음을 의미한다.

#### 4.2 Shadowgraphy를 활용한 화염 전파 및 연소실 온도 구배 형성 분석

예혼합기의 연소 화염면 발달 과정을 분석하고 연소실 내 온도구배에 따른 밀도 구배 특성을 분석하기 위해 Shadowgraphy 기법을 활용하여 화염 과정을 가시화 하였다. Shadowgraphy 기법은 매질의 밀도차이에 의해 빛의 굴절 각도가 다른 현상을 이용하여 매질의 밀도 구배를 정성적/정량적으로 분석할 수 있는 가시화 기법이며, 화염면의 발달, 연료 기상 분무의 발달 과정을 가시화 하는데 주로 사용된다.<sup>5)</sup>

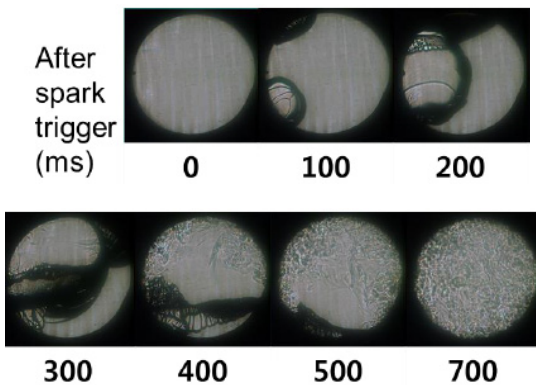


Fig. 4 Combustion process visualized by shadowgraph diagnosis

Fig. 4에는 Shadowgraphy 기법으로 촬영된 연소 과정을 나타낸다. 연소실 위쪽과 아래쪽 모서리에 설치된 2개의 스파크 플러그로부터 점화된 예혼합기로 형성된 화염 전단면의 전파에 따라 연소가 진행되며, 부력의 영향에 의해 고온의 가스가 더 빨리 위쪽으로 상승되는 특성 때문에 아래쪽에서 시작된 화염이 더 빨리 위쪽으로 전파되는 것을 볼 수 있다. 그리고 상부의 스파크 플러그로부터 개시된 화염 발달은 부력에 의해 아래쪽보다는 수평한 방향으로 주로 화염 발달이 진행된다. 두 화염이 겹쳐지는 면에서 복잡한 형상의 물결무늬가 발생하는데, 이는 화염 간 화염뒤쪽면에서 온도구배가 복잡하게 발생하여 밀도구배가 형성된 것을 의미한다. 연소 후기 및 종료 후 시점에서 연소실 벽면 부근에서 복잡한 형상의 물결무늬가 발생한다. 이는 연소실 내 가스로부터 연소실 벽면으로의 활발한 열전달로 인해, 연소실 벽면쪽에 위치한 가스의 열손실이 발생하고 이로 인해 연소실 내에서 급격한 온도 구배가 형성되어 이에 따른 매질의 밀도차이로 인해, 평행광의 굴절이 이루어지면서 굴절무늬가 복잡하게 나타나는 것이다. 이후 온도구배가 연소실 중앙쪽으로 확대되면서, 연소실 내부 전역에 걸친 굴절무늬가 복잡하게 나타난다. 즉 연소과정 후기 시점인 연료 분사를 개시하는 시점에서 이미 연소실 내에서는 연소실 중앙과 벽면 근처 지점 간에 온도구배가 발생하였음을 알 수 있다. 따라서 Bulk 압력으로부터 계산한 연소실 내 온도는 전체를 평균한 값이며, 연료 분사가 이루어지는 중앙 영역은 실제로 온도가 더 높을 것이라 예측할 수 있다. 따라서 연소실 중앙과 벽면근처 간 온도구배를 측정할 필요가 있으며, 향후 연구에서 고속도로 반응하는 열전대를 활용하여 이를 계측 및 분석할 계획이다.

#### 4.3 Shadowgraphy를 활용한 연료 분무 가시화 계측 예시

Fig. 5는 챔버 내 예 연소 과정에서 연소압력이 하락하는 도중, 압력 60 bar, 온도 950 K에 도달하는 순간(디젤엔진의 압축 상사점에 해당되는 온도

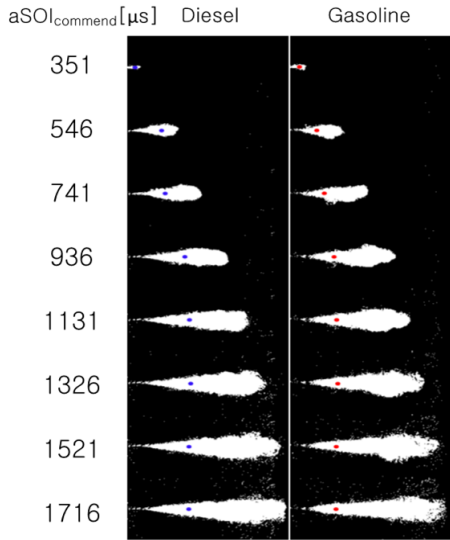


Fig. 5 Spray image visualized by shadowgraph diagnosis

와 압력), 연료를 분사하고 고속카메라와 광원을 동기화 해서 Shadowgraphy 기법으로 얻은 분무 이미지를 나타낸다. 연료로는 디젤과 가솔린을 동일한 인젝터를 사용하여 분사하였으며, 분사압력은 1500 bar로 설정하였다. 그림의 왼쪽 모서리 중간지점에 노즐팁이 위치해 있으며, 오른쪽 방향으로 분사되어 분무발달과정이 진행된다. 분무 이미지에 표시된 파란색과 빨간색 점은 Shadowgraphy 기법으로 촬영하는 동시에 다른 가시창을 통해 미 산란기법을 이용해 얻은 액상 분무의 최대 도달거리를 나타낸다. Shadowgraphy 분석을 통해 분무의 기상영역을 계측할 수 있으며, in-house 프로그램을 이용하여 획득한 이미지를 배경이미지와 빼줌으로써 Fig. 5와 같이 분무영역만 하이라이트 되도록 변환할 수 있다. 분무 개시 후 시간에 따라 분무가 발달되는 과정을 확인하고, 분무 이미지의 정량적 분석을 통해 분무 도달거리, 분무각, 분무 투영 면적 등을 계산할 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 정적 챔버를 활용하여 분무 시험을 수행함으로써 실제 엔진 내부의 압력과 온도를 모사한 조건에서 상용 인젝터의 분무 발달 과정을 가시화 할 수 있고, 정량적인 분석을 할 수 있음을 확인하였다.

## 4. 결 론

본 연구에서는, 예혼합기의 연소를 통하여 실제 디젤 엔진과 가솔린 엔진의 연소실 내 고온 고압의 환경을 모사할 수 있는 정적 연소실의 개발과정을 기술하였다.

1) 정적 연소실 시스템은 예혼합기 구성 시스템, 흡배기 배관, 정적 연소실, 점화 시스템, 안전장치 등으로 구성되었다.

2) 3개의 초기 밀도/압력 조건에 대하여 각각 12회 반복적인 연소시험이 행해졌으며, 압력곡선의 최대 표준 편차가 최고 압력 기준 2% 이내 오히려 우수한 반복성이 확보되었다. 연소 초기 급격한 압력 상승 이후, 주변으로의 열손실로 인해 압력이 하강하였다. 초기 압력과 밀도가 높을수록 연소 기간이 증가하였다.

3) Shadowgraphy 기법을 통해 화염 전파특성과 연소실 내 온도구배 특성을 파악한 결과, 부력 효과로 인해 아래쪽에서 발생한 화염이 위쪽 발생 화염보다 더 빨리 위쪽 방향으로 전파되는 것을 확인하였으며, 벽면으로의 열전달로 인하여 벽면 쪽에서 급격한 온도구배가 발생하는 것을 확인하였다.

4) 디젤 엔진의 압축 상사점 운전 조건에서 Shadowgraphy 기법 및 미산란 기법을 통해 디젤과 가솔린 분무의 액상과 기상 영역을 계측하였으며, 본 챔버를 활용하여 다양한 분위기 압력 및 온도 조건에서 연료 분무의 정량적 분석이 가능함을 확인하였다.

## References

1. J. E. Dec, 2009, "Advanced Compression-ignition engines Understanding the In-cylinder processes", Proc. Combust Inst 2009, Vol. 32, No. 2, pp. 2727-2742
2. B. C. Choi, 1998, "The State of the Art of Automotive Diesel Engine Technologies", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 12-19.

3. P. M. Lillo, 2012, "Diesel Spray Ignition Detection and Spatial/Temporal Correction", SAE Int. J. Engines Vol. 5, No. 3, pp. 1330-1346.
4. K. S. Koo, 2012, "A Study on the Mechanical Properties of the Friction Welding with Solid Shaft of SM45C", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 21, No. 6, pp. 932-937
5. G. S. Settles, 2001, "Schlieren and Shadowgraph Techniques", Springer-Verlag.