

고온 고압 정적 연소실에서 연소과정에 따른 온도 분포 측정

김기현
신라대학교 융합기계공학부

Study of spatial temperature distribution during combustion process in a high temperature and pressure constant volume chamber

Ki-hyun Kim

Division of Mechanical Convergence Engineering, Silla University

요약 디젤 엔진의 연비와 배기를 개선하고자 하는 노력으로 다운사이징이 강화되고 있다. 이에 따라 엔진의 사이즈는 작아지고, 엔진 연소실 내 온도와 압력은 상승하는 추세이다. 따라서 높은 온도와 압력 조건에서 연료 분무의 발달과정과 연소과정 연구가 매우 중요하다. 본 연구에서는 디젤 엔진 연소실의 고온 고압 환경을 벤치에서 모사해줄 수 있는 정적 연소실을 개발하였다. 정적 연소실은 예혼합기를 연소시켜 순간적으로 온도와 압력을 급격하게 상승시킨 다음, 주변으로의 열전달에 의해 온도와 압력이 감소할 때 시험 목표조건인 온도와 압력 조건에 다다르면, 연료 분사기에 신호를 인가하여 연료 분무를 개시하며 퀴즈 창을 통하여 연료 분무를 가시화 한다. 이 때, 정적 연소실 내에 연료 분무가 이루어지는 영역의 온도를 정확히 측정하여 정확한 시험 조건을 형성해야 한다. 본 연구에서는 고속으로 온도를 측정할 수 있는 열전대를 직접 개발 및 제작하여 연소실 내 시공간적 온도분포를 측정하였다. 측정 결과, 전체 체적 온도보다 연료 분무가 개시되는 중심 공간의 온도가 더 높게 나타났으며, 이는 연소실 벽면으로의 열전달 때문임을 확인하였다. 또한 횡방향으로의 온도 편차는 약 10% 이내 수준이었으나, 종방향으로 온도편차가 최대 15%수준으로 나타났고 이는 부력으로 인한 고온의 연소가스의 상승효과 때문으로 판단되었다.

Abstract Downsizing is widely applied to diesel engines in order to improve fuel efficiency and reduce exhaust emissions. Engine sizes are becoming smaller but pressure and temperature inside combustion chambers are increasing. Therefore, research for fuel spray under high pressure and temperature conditions is important. A constant volume chamber which simulates high temperature and pressure likely to be found in diesel engines was developed in this study.

Pressure and temperature were increased abruptly because of ignition of the pre-mixture in the constant volume chamber. Then pressure and temperature were gradually decreased due to the heat loss through the chamber wall. Fuel spray occurred when temperature and pressure were reached at the target condition. In this experiment, the temperature condition should be exactly defined to understand the relation between fuel evaporation and ambient temperature. A fast response thermocouple was developed and used to measure the temporal and spatial temperature distribution during the combustion process inside the combustion chamber. In the results, the core temperature was slightly higher than the bulk temperature calculated by the gas equation. Ed-note: do you want to say 'ideal gas equation'? This was attributed to the heat transfer loss through the chamber wall. The vertical temperature deviation was higher than the horizontal temperature deviation by 5% which resulted from the buoyancy effect.

Keywords : Constant volume chamber, combustion, temperature measurement, bulk temperature, core temperature

본 논문은 신라대학교 교내연구비 지원사업으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Ki-hyun Kim (Silla Univ.)

Tel: +82-51-999-6925 email: khkim3@silla.ac.kr

Received December 14, 2016

Revised December 27, 2016

Accepted January 6, 2017

Published January 31, 2017

1. 서론

디젤 엔진은 높은 압축비 및 희박 연소로 인해 수송 기관의 동력기관으로써 각광받아 왔다.[1] 최근에는 연비와 배기의 지속적 개선을 위해 엔진의 다운사이징이 강화되고 있는 추세이다.[2]

엔진의 다운사이징은 엔진의 비체적을 줄이고, 비출력을 증가시키는 방법으로 엔진 연소실내의 온도와 압력의 증가가 수반되게 된다. 디젤 엔진에서는 연료 분무의 발달 과정에 따라 연소과정, 배기가스 배출물 형성 과정 등이 지배되므로, 이와 같은 고온 고압 조건에서의 연료 분무 발달 과정에 대한 연구의 중요성이 강화되었다.

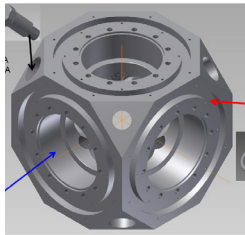


Fig. 1. Body of the constant volume chamber

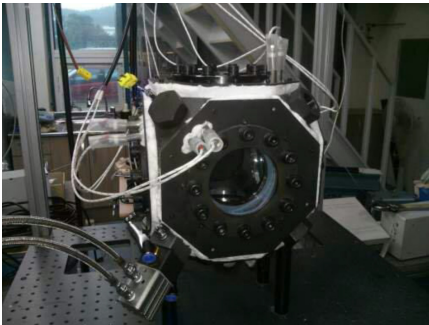


Fig. 2. Photograph of constant volume chamber system

이에 따라, 디젤 엔진 내 고온고압조건에서 연료 분무의 발달 과정과 연소과정을 물리적으로 분석하기 위하여 다양한 광가시화 기법을 적용한 연구가 진행되어 왔다. Pickett 등은 실제 디젤 엔진에서 연료가 분사되는 약 50bar 이상 압력, 1000K 근방 온도 조건을 정적 연소실에서 구현한 후, 연료 분무와 연소과정을 퀴즈창을 통하여 가시화 한 바 있다.[3] 본 연구에서는 이와 같이 고온 고압을 모사할 수 있고, 연료 분무와 연소과정을 다양한 각도에서 가시화 할 수 있는 정적 연소실의 개발과정을 소개한다. 특히, 정적 연소실 내에서 발생하는 예혼합 연

소과정동안에 연소실 내의 온도분포조건에 대해 집중적으로 연구하였다.

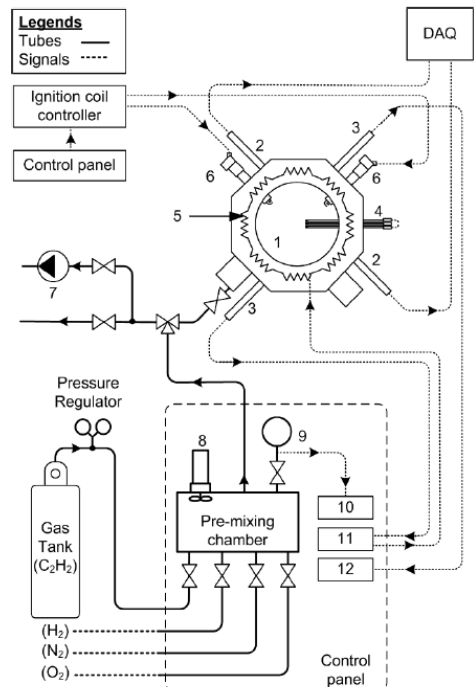
2. 본론

2.1 정적연소실 몸체 및 구성

Fig. 1과 Fig. 2는 정적 연소실의 몸체 및 정적 연소실이 설치된 시스템의 사진을 나타낸다. Table 1은 정적 연소실의 제원을 나타낸다. 정적연소실은 정육면체 형태로, 직경 10cm의 구멍을 면의 중심 방향으로 관통하여 총 6개의 방향에서 정적 연소실 내부를 관찰 할 수 있다. 정적 연소실은 표면 경도가 높고 풀립열처리를 통해 충격과 진동에 강하여 기계구조용 강으로 널리 사용되는 SM45C를 사용하여 제작되었다. [4] 최대 압력 150bar, 최대 온도 2000K를 견딜 수 있도록 제작되었다.

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



- 1: Quartz window
- 2: Pressure transducer (Kistler Type 6041, water-cooled)
- 3: Thermo-couple for chamber wall
- 4: Injector
- 5: Heater
- 6: Spark plug & ignition coil
- 7: Vacuum pump
- 8: Mixing fan
- 9: Pressure sensor (high resolution & accuracy)
- 10: Pressure indicator
- 11: Heater controller
- 12: Temperature indicator for chamber wall (not to scale)

Fig. 3. Schematic diagram of constant volume chamber system

정육면체의 6면에 대해 필요한 장치를 설치할 수 있다. 연료 분무가시화를 수행할 경우, 한쪽면에는 연료 분사기를 설치하고, 나머지 5면에는 쿼츠창을 설치함으로써 연료 분무를 정면, 위, 아래, 측면 방향에서 가시화 할 수 있다. 정적 연소실 6면의 가장자리에는 U자 홈을 가공하여 각 면 당 2kW급의 전기히터를 매설 설치하여 정적 연소실 벽면의 온도를 약 550K까지 상승시킬 수 있다. 벽면의 온도를 상승시킴으로써 연소실 내의 예혼합기의 완전 연소를 촉진 할 수 있다.

정적연소실의 8개 꼭지점 부분을 모따기 한 후, 홀을 가공하여 스파크 플러그, 열전대, 그리고 흡배기 밸브 등을 설치하였다. 위와 같은 정적 연소실은 가로 세로 800mm, 두께 20mm의 SM45C 판으로부터 200mm 상부에 설치되었으며, 알루미늄 프로파일을 사용하여 전체 시스템의 지지대를 구성하였다.

2.2 연료분무 가시화 연구시, 정적연소실 구동 방법

Fig. 3은 정적 연소실 전체 시스템의 개요도를 나타낸다. 정적 연소실 내의 온도와 압력을 실제 엔진의 운전조건과 유사하게 상승시켜주기 위하여, 예혼합기를 연소시키게 되는데 이에 필요한 구성 시스템이 예혼합기 준비 시스템, 흡배기 가스 배관, 점화 시스템 등이다. 예혼합 가스 준비 시스템에서는 C_2H_2 (아세틸렌), H_2 (수소), O_2 (산소), N_2 (질소) 등 네가지 가스를 예혼합 챔버 (premixing chamber)에 일정한 비율로 혼합한다. 이 때 오차범위 0.5 mbar 압력센서를 사용하여 기체의 분압 조절을 통해 조성을 맞춘다. 조성을 맞춘후 기체의 밀도차이에 따른 분리를 막기 위해 혼합 교반기를 사용하여 예혼합기를 충분히 균질하게 혼합한다. 가스의 비율은 예혼합기가 완전 연소된다는 가정하에 연소 후 산

소 농도가 0%가 되도록 조절한다. 이는 정적연소실에서 예혼합기의 연소 이후 연료 분사가 개시되는데 연료의 연소를 방지하여 순수 연료 분무의 발달과정만 관찰하기 위함이다.

예혼합 챔버에서 준비된 예혼합기를 흡기 배관을 통해 정적 연소실에 유입시킨다. 흡기 라인에는 1m간격으로 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. 이 때 가스의 목표 유입량은 정적 연소실의 압력과 온도를 상시 모니터링하고 있으므로, 이로부터 정적 연소실로 유입되는 가스의 밀도를 계산하여 목표 밀도가 맞춰지면 밸브를 폐쇄한다.

정적 연소실 내로 유입된 예혼합기를 연소시키기 위해 정적 연소실 내부에는 2개의 점화플러그가 위 아래에 대각 방향으로 설치되어 있다. 두 점화플러그는 동시에 스파크를 발생시키며 점화플러그로부터 화염 전파가 발생한다. 2개의 점화플러그를 설치함으로써 연소 시간을 단축 시키고, 연소실내 공간적인 온도차를 최소화한다. 연소가 발생하는 동안 연소압력은 수냉식 압력 센서 (Kistler, 6052A)를 통해 측정된다.

2.3 연소 조건 및 압력 특성

본 연구에서 사용된 예혼합기의 초기 조건은 다음과 같다. 완전 연소를 위해 정적연소실의 벽면을 가열하였으므로, 예혼합기의 초기온도는 458K으로 가열되었다.

$$\rho = 22.82 \text{ kg/m}^3, P = 3.0 \text{ MPa}, T = 458 \text{ K}$$

ρ 는 밀도, P는 압력, T는 온도를 나타낸다. 조성은 아래와 같다. 미량의 수소를 첨가하여 연소속도를 빠르게 함으로써 완전 연소를 촉진시킨다.

$$C_2H_2 = 3.2\%, H_2 = 0.5\%, \\ O_2 = 8.25\%, N_2 = 88.05\%$$

Fig. 4는 정적 연소실 내부의 예혼합기를 점화시켰을 때 발생한 압력 변화를 나타낸다. 동일한 조건에서 시험을 12번 반복하여 압력곡선을 평균하였다. 검은색 실선이 압력의 평균 곡선이며, 빨간색 실선은 12번 실시한 시험의 압력의 표준편차를 나타낸다. 표준편차 최대값이

2bar 이하 수준으로 최대압력의 2% 미만 수준이다. 따라서 높은 수준의 반복성을 나타낼 수 있다.

점화 신호가 인가된 이후 화염 발달로 인해 연소가 진행되면서 초기 압력 상승이 급격하게 일어나는 것을 알 수 있다. 연소의 진행에 따라 최대 압력에 도달한 이후, 연소실 벽면을 통한 외부로의 열전달로 인해 압력이 하강된다. 연료 분무 가시화 시험은 압력이 하강되다가 모사하고자 하는 분위기 압력 조건(실제 엔진에서 압축 행정 말기 조건)에 도달하면 연료 분사기에 분사 신호를 인가하고 이에 따라 분무가 개시되며 동시에 고속카메라 등을 구동시켜 분무 가시화를 수행한다. 이 때, 연소실내 전체 온도(bulk temperature)는 예혼합기의 밀도를 알고 있으므로 기체방정식으로부터 구할 수 있다.

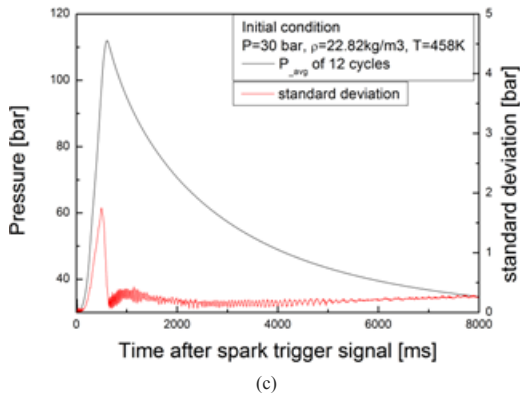


Fig. 4. Pressure trace and standard deviation of pressure trace after spark trigger in constant volume combustion chamber

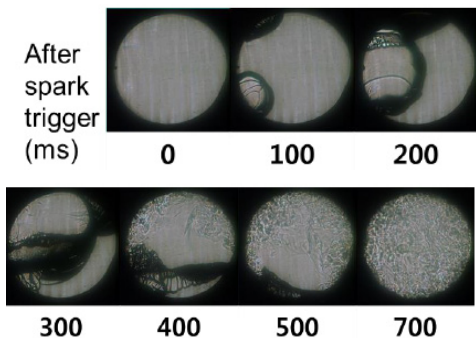


Fig. 5. Combustion process visualized by shadowgraph diagnosis

Fig. 5는 그림자기법(Shadowgraphy)으로 촬영된 연소과정을 나타낸다.[5]연소실 상 하단에 설치된 2개의

점화플러그로부터 화염이 개시되며, 화염 전단면의 전파에 따라 연소가 진행되며 부력의 영향으로 인해 고온의 가스가 더 빨리 위쪽으로 상승되는 특성 때문에 화염의 발달이 위쪽방향으로 치우쳐 나타나는 것을 알 수 있다.

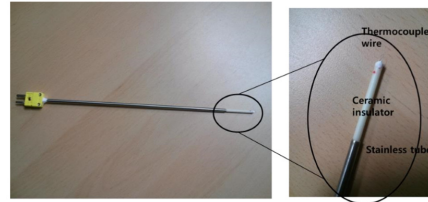


Fig. 6. Home-made thermocouple (Ktype, wire diameter=75 μm)

연소 후반부로 진행되면서 연소실 내 가스로부터 연소실 벽면으로의 활발한 열전달로 인해 연소실 벽면쪽에 급격한 온도 구배가 형성되고 이에 따른 매질의 밀도차이로, 평행광의 굴절이 이루어지면서 굴절무늬가 복잡하게 나타난다.

2.4 연소과정 동안의 시공간적 온도 특성

2.3에서 언급한 바와 같이, 정적 연소실 내의 전체 온도(bulk temperature)는 다음의 기체 방정식을 사용하여 연소압력으로부터 환산하여 구할 수 있다.

$$T_{bulk} = \frac{P^* MW}{\rho R_u Z}$$

P는 연소실내 압력, MW는 혼합기체의 평균 분자량, ρ는 혼합기체의 밀도, R_u 는 일반기체상수, Z는 Compressibility factor를 나타낸다. 그러나 위의 식으로 계산한 온도는 연소실 내의 공간적 온도 구배를 고려하지 않은 전체 평균 온도이다. 연소과정과 종료 이후과정에서 연소실 벽면으로의 열전달 및 부력효과등으로 인해 공간적 온도분포가 발생할 것을 예측할 수 있다. 연료 분무 가시화 시험에서 실제 연료 분무가 이루어지는 영역은 보통 정적 연소실의 중앙쪽 방향을 향한다. 이는 여러 방향에서 분무 가시화를 용이하게 수행하기 위함이다. 즉, 연료 분무가 이루어지는 영역에서의 온도 특성을 확인할 필요가 있다.

Fig. 6은 연소 과정 및 종료 후 과정동안에 정적연소실에서 발생하는 과도적인 온도 변화를 측정하기 위하여

직접 제작한 열전대를 나타낸다. Ktype으로 최대 1600K 까지 측정 가능하다. 정적 연소실 내 기체의 온도를 직접적으로 측정해야 하므로 열전대 소선을 외부로 노출한 타입을 사용하였고 측정 시간 1ms 이내의 빠른 응답성을 확보하기 위하여 75 μ m의 굵기의 열전대 소선을 사용하였다. 열전대 소선의 노출길이 1은 열전대 소선과 소선을 지지하는 Ceramic insulator를 통해 전도로 소실되는 열손실로 인한 온도 측정 오차가 무시될 수 있을 정도로 하기 위해, 다음의 식에 근거하여 설계되었다.[6]

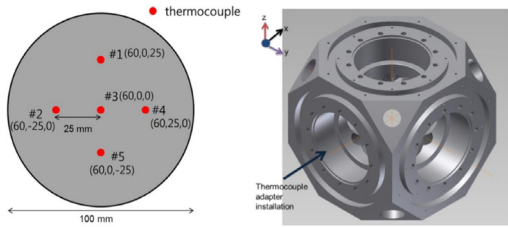


Fig. 7. Thermocouple location in adapter and installation direction in constant volume chamber

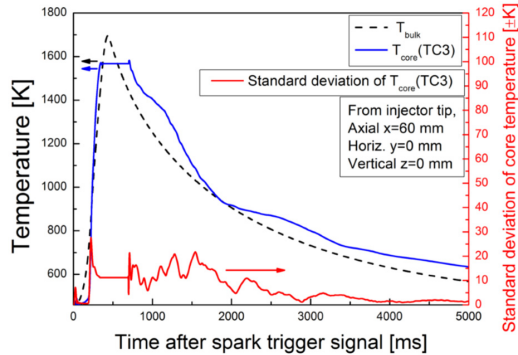


Fig. 8. Bulk temperature and core temperature (#3 thermocouple)

$$l > 10 * \sqrt{\alpha \tau}$$

$$\tau = \frac{\rho_t c_t d_t}{4h}$$

τ 는 시간상수이며, α 는 열전대 소선의 열확산율 (thermal diffusivity), ρ_t 는 열전대 소선의 밀도, c_t 는 열전대 소선의 비열, d_t 는 열전대 소선의 직경, h 는 열전달 계수를 나타낸다. 위의 식으로부터 열전대 소선의 노출거리는 8mm로 선정되었다.

열전대는 정적 연소실 한쪽 벽면에 열전대 어댑터에

설치되어 장착되었다. Fig. 7은 열전대 어댑터와 열전대 어댑터가 정적 연소실에서 설치되는 위치와 방향을 나타낸다. 1번에서 5번까지의 각각의 열전대들은 x축 방향 (연료 분무의 진행방향)으로 60mm 돌출되도록 하여 x축 선상에서 정적 연소실의 중앙에 오도록 하였다. 따라서 x축 선상의 연소실 내부 정 중앙부에서 y축 방향 (지면에 수평한 방향, #2, #4 열전대)과 z축 방향 (지면에 수직한 방향, #1, #5 열전대)의 온도 구배를 측정할 수 있다.

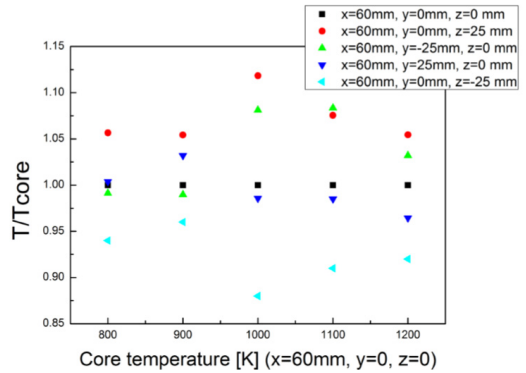


Fig. 9. Temperature distribution according to the location of thermocouple in constant volume chamber

Fig. 8은 기체방정식으로부터 계산된 전체 온도 (Bulk temperature, 검은 점선)과 #3 열전대를 사용하여 측정된 중심부 온도 (core temperature, 파란색 실선)의 변화를 나타낸다. 초기 연소과정에서 압력이 급격하게 상승하는 동안에는 두 온도가 거의 비슷하다. 이는 매우 짧은 시간동안에 연소가 발생하므로 주변으로의 열전달이 일어나기에 시간이 충분치 않기 때문이다. 그러나 자세히 관찰해보면 파란색으로 표현된 중심부 온도가 초기 상승이 다소 느리나 곧 전체 온도를 초과하여 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 열전대의 측정지연 때문에 초기 온도 상승이 늦게 나타나지만 중심부 온도는 외부로의 열전달이 가장 낮은 지역이므로 전체온도보다 온도가 높게 나타나게 된다. 1600K을 초과하는 지점에서 열전대로 측정된 중심부 온도는 신호가 cut-off되는데, 이는 k-type 열전대의 온도 측정 한계 범위가 1600K이기 때문이다. 최고 온도에 도달한 이후, 외부로의 열전달로 인해 전체 온도 및 중심부 온도 모두 서서히 하락하게 된다. 그러나 상대적으로 열전달 손실이 적은 중심부 온도가 전체온도보다 더 높은 값을 보이게 된다. 연료 분무 가시화 시험시 연료 분무가 실제 이루어지는 영역은 중심부이므로 계산으로 구한 전체온

도보다 더 높은 온도 영역에 연료를 분사한다는 것을 알 수 있다. 이후 온도가 하락하는 과정에서 정적연소실내부의 유동에 의해서 중심부온도는 맥동을 나타내나 계속적으로 전체온도보다는 높은 특성을 보인다.

Fig. 9는 Fig. 7에 설치된 5개의 열전대로부터 측정된 정적 연소실내의 온도 분포를 보여주고 있다. T_{core}는 중심부 온도 즉 #3 열전대로부터 측정된 온도로서 각 열전대에서 측정된 온도가 #3 열전대에서 측정된 온도 대비한 비율(스파크 인가 이후 1200ms 시점에서)을 나타내고 있다. 우선 y방향으로의 온도분포를 살펴보면 (x=60mm, y=±25mm, z=0mm) 조건에서 중심부 온도에 비하여 10% 이내의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 반면, z방향의 온도분포를 살펴보면, (x=60mm, y=0mm, z=±25mm) 조건에서 y방향에 비하여 상대적으로 큰 온도편차를 나타내는 것을 알 수 있는데 최대 15%의 차이를 나타낸다. 특히, z=-25mm 열전대의 경우 전체적으로 온도가 낮고 중심부 온도 대비 최대 15% 더 낮은 온도를 나타냈다. 반면 z=25mm 열전대의 경우 전체적으로 온도가 높고 중심부 온도 대비 최대 15% 더 높은 온도를 나타낸다. 이는 부력으로 인해 고온의 가스가 위쪽으로 상승함에 따라 연소실의 상부쪽 온도가 더 높게 나타나는 것임을 알 수 있다.

단공 분사기의 경우 연료 분무의 폭이 약 40mm 수준이므로, 분무가시화 시험시 분무가 발달되는 영역에서 상하좌우의 최대 주변 온도편차가 약 ±10% 수준임을 판단할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 예혼합기의 연소를 통해 실제 엔진의 연소실내 고온 고압 환경을 모사할 수 있는 정적 연소실의 개발과정과 연소실 내부의 온도분포특성에 대해 실험적 조사를 수행하였다.

1. 정적 연소실 내부의 예혼합기 연소를 통해 연소압력은 초기에 급격하게 증가하나, 주변으로의 열전달로 인해 다시 하강한다.
2. 연소실 내 시공간적 온도 특성을 분석하기 위해 고속성능(반응시간 1ms 이하)의 열전대를 직접 제작하였으며, 연소가스의 온도 측정을 수행하였다.
3. 온도측정 결과, 압력으로부터 계산된 전체온도 대비 연소실 중심온도가 더 높게 나타났다. 이는 연

소실 중심에서는 연소실 벽면외부로의 열전달에 덜 영향을 받기 때문이다.

4. 연소실 내부의 공간적 온도 분포 특성을 측정해본 결과, y방향(지면과 수직인 방향)으로는 약 10%이내의 온도편차를 나타냈으나 z방향(지면과 수직인 방향)으로는 부력에 의한 고온의 연소가스 이동으로 인해 최대 15% 수준의 온도편차가 발생하였다.

References

- [1] J. E. Dec, "Advanced compression-ignition engines-understanding the in-cylinder processes", *Proc. Combust Inst* 2009, vol. 32, no. 2, pp. 2727-42, 2009.
- [2] B. C. Choi, "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, 1998.
- [3] P. M. Lillo, "Diesel Spray Ignition Detection and Spatial/Temporal Correction", *SAE Int. J. Engines* vol. 5, no. 3, 2012-01-1239, 2012.
- [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, 2012. DOI: <https://doi.org/10.7735/ksmte.2012.21.6.932>
- [5] G. S. Settles, "Schlieren and Shadowgraph Techniques", *Springer-Verlag*, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56640-0>
- [6] Miles, P. C., Gouldin, F. C., "Determination of the time constant of fine-wire thermocouples for compensated temperature measurements in premixed turbulent flames." *Combust. Sci. Tech.* 83:119, 1992.

김기현(Ki-hyun Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (기계공학 학사)
- 2014년 8월 : 한국과학기술원 기계공학과 (기계공학 박사)
- 2014년 7월 ~ 2016년 1월 : 현대중공업 선임연구원
- 2016년 1월 ~ 2016년 8월 : 자동차부품연구원 선임연구원
- 2016년 9월 ~ 현재 : 신라대학교 융합기계공학부 교수

<관심분야>

열유체공학, 열전달, 연소공학, 내연기관