정적 연소기 내 가솔린 직접 분사 시 분무 및 연소특성에 관한 연구

김경배[†] · 강석호^{*} · 박기영^{*} · 서준협^{*} · 이영훈^{*} · 김대열^{**} · 이성욱^{***}

A Study of Injection and Combustion Characteristics on Gasoline Direct Injection in Constant Volume Chamber

Kyung-Bae Kim, Seok-Ho Kang, Gi-Young Park, Jun-Hyeop Seo, Young-Hoon Lee,
Dae-Yeol Kim and Seong-Wock Lee

Key Words: GDI(가솔린 직분사), CVC(정적연소기), Spray characteristics(분무특성), Combustion characteristics(연소특성), Emission characteristic(배출물 특성)

Abstract

It is being more serious problems that the pollutant and the greenhouse gas emitted from the internal combustion engines due to the increasing demand of automobiles. To counteract this, as one of the ways has been studied, GDI type engine, which is directly injected into the combustion chamber and burns by a spark ignition that chose the merits of both gasoline engine and diesel engine, was appeared. The combustion phenomena in this GDI engine is known to contribute to combustion stability, fuel consumption reduction and reductions of harmful substances of exhaust gas emission, when the fuel spray of atomization being favorable and the mixture formation being promoted. Accordingly, this study analyzed the affection of ambient temperature and fuel injection pressure to the fuel by investigate the visualization of combustion, combustion pressure and the characteristic of emission, by applying GDI system on the constant combustion chamber. As a result, as the fuel injection pressure increases, the fuel distribution in the combustion chamber becomes uniform due to the increase of penetration and atomization. And when ambient temperatures in the combustion chamber become increase, the fuel evaporation rate being high but the penetration was reduced due to the reduction of volume flux, and confirmed that the optimized fuel injection strategy is highly needed.

1. 서 론

내연기관으로부터 배출되는 연소가스 중의 각종 오염 물질은 최근 자동차의 수요증가에 따라 더욱 심각한 공해문제로 나타나고 있다. 유해물질 배출뿐만 아니라 지

구온난화에 따른 CO₂ 배출 또한 문제가 되고 있으며, 이에 대한 대책의 마련이 필요한 실정이다.

이에 대응하기 위해 오랫동안 사용되어온 가솔린엔진과 디젤엔진의 각각의 장점만을 채택하는 엔진의 구상이 오래 전부터 시도되어온 결과 중의 하나로 연소실에 가솔린 연료를 직접 분사하고 스파크 점화에 의해 연소시키는 엔진의 출현이 가능해졌다. 이와 같은 개념에 기초한 엔진을 보통 가솔린직접분사(Gasoline Direct Injection: GDI)엔진이라고 부른다⁽¹⁾.

가솔린 직접분사 방식의 경우에는 기존의 포트분사 방식(Port Fuel Injection: PFI)에 비하여 출력 및 연비의 향상을 가져왔을 뿐 아니라 온실가스로 분류되는 이산

(2012년 3월 26일 접수 ~ 2012년 6월 11일 심사완료, 2012년 9월 7일 게재확정)

[†]국민대학교 자동차공학 전문대학원

^{**}동양미래대학 기계공학부

^{***}국민대학교 자동차공학과

[†]책임저자, 회원, 인천대학교 기계시스템공학부

E-mail : kimkb@incheon.ac.kr

TEL : (032)835-8672 FAX : (032)835-0715

화탄소의 배출을 획기적으로 저감할 수 있는 등 여러 가지 이점이 있다.

하지만 GDI 기관은 기존 PFI 방식에 비해 인체의 위해성이 있다고 밝혀진 입자상 물질(Particulate Matter: PM)과 질소산화물(NO_x)의 배출량이 크게 증가하는 문제가 있다²⁾.

특히 PM의 경우 수많은 발암물질이 흡착되어 나노 수준의 극 미세입자(Nano Particle) 상태로 배출되는데, 이러한 극 미세입자는 호흡기를 통해 인체로 흡수되는 과정에서 입자의 크기가 작고, 호흡기와 접촉하는 표면적이 증가하기 때문에 유해물질의 흡착률 및 생체조직에 대한 반응성이 증가하여 독성을 일으키기 쉽고 이로 인한 폐 질환을 유발하게 된다. 이러한 이유로 Euro 6부터는 디젤기관뿐만 아니라 가솔린 직접분사 방식의 기관에 대해서도 PM의 입자개수에 대한 규제를 시행하고 있다³⁾.

GDI 기관이 EURO 6 배출가스 규제를 충족시키기 위해서는 이러한 PM과 NO_x 의 저감이 필수적인데, 이를 위해 GPF(Gasoline Particulate Filter)와 SCR(Selective Catalytic Reduction) 등의 후처리 장치를 통한 저감방법이 연구되고 있으며, 이에 앞서 최적의 분사전략을 통한 이상적 연소를 이루는 것이 선행되어야 한다⁴⁾.

선행연구로써 박정환 등은 분사 조건이 다공형 GDI 인젝터의 분무 거동에 미치는 영향⁵⁾을 통하여 연료 분사압력 증가에 따라 분사 유량이 증가하며 고압의 분사압력에서는 분위기 압력의 영향이 거의 없으며 저압의

분사압력일수록 분위기 압력에 의한 분사유량이 작게 나타난다고 밝혔으며 박수한 등은 분위기 조건이 바이오디젤과 에탄올 혼합연료의 분무 거동 및 미립화 특성에 미치는 영향⁶⁾을 통하여 분위기 압력 증가는 연료의 분무 도달 거리를 억제하고 분위기 온도의 증가는 분무 도달 거리를 증가시키며 이는 기체온도 증가가 분사된 연료 액적의 점성계수 및 표면장력을 감소시켜 분무 하류에서의 미립화가 촉진됨에 의함이라고 밝혔다.

선행연구를 통해 연료 분사압력과 분위기 압력 및 온도가 연료의 미립화 및 기화에 미치는 상관관계는 활발히 연구가 진행되어 왔으며, 이에 본 연구에서는 정적연소기에 GDI 시스템을 적용하여 연소가시화와 연소압력 및 배출가스 특성 분석을 통하여 분위기 온도 및 연료 분사압력이 연소에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

정적 연소기 내 연소현상을 가시화하기 위하여 보어 86 mm, 폭은 39 mm의 정적연소기를 제작하였고, 그 주변에 고속 디지털 카메라를 설치하여 연소현상을 촬영하였다. 정적연소기 주변장치로 흡/배기 밸브, 피에조 방식의 압력센서, 점화를 위한 스파크 플러그를 정적연소기 중앙에 설치하였으며, 연소가시화를 위해 정적연소기 한 쪽 면에 직경 120 mm, 두께 25 mm의 강화유

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

리를 설치하였다. 정적연소기 내부에 스윙모터를 이용하여 난류를 생성시켜 연료와 공기의 균일한 혼합을 도왔으며, 연소 후 연소실 내 잔류가스는 진공펌프와 감압탱크를 이용하여 제거하였다.

실험장치의 제어 및 데이터 획득에는 National Instruments사의 DAQ NI-6251과 Labview 8.5를 사용하였으며, 연소 종료 후 Horiba MEXA-554 JKNOX를 사용하여 배출가스를 분석하였다.

정적연소기 내의 압력변화를 측정하기 위해 피에조타입 압력센서를 이용하여 압력변화를 측정된 뒤 열 발생률을 계산하여 연소를 해석하였다.

본 연구에서는 가솔린을 연소실 내 고압으로 분사하기 위해 GDI 시스템이 적용된 1.6L 급 차량의 연료공급장치를 적용하였다. 1차 연료펌프는 펌프 내 내장되어 있는 모터를 통해 구동하였으며 고압연료펌프는 실린더 헤드의 캠 샤프트와 AC 모터를 체인으로 연결하여 구동하였다.

고압연료펌프와 연결된 AC모터의 회전속도는 200 rpm으로 고정하였고 연료분사압력의 조절은 고압연료펌프 후단의 솔레노이드 방식의 연료압력 조절밸브를 통하여 이루어지는데, 이를 제어하기 위해 연료압력센서와 연동하여 목표압력을 맞출 수 있도록 레일압력 제어로직을 구성하였다.

연소실 내 연료분사를 위해 정적 연소기 상부에 인젝터를 설치하였으며, Labview 8.5와 인젝터 드라이버를 통해 인젝터 작동시간을 제어하였다.

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

2.2 실험조건 및 방법

본 연구에서는 분위기 온도 및 연료 분사압력에 따른 연소 및 배출물 특성을 파악하기 위해 분위기 온도를 323K, 333K, 343K, 353K로 설정하고 연료분사압력을 4 MPa, 5 MPa, 7 MPa, 9 MPa로 변경하여 실험을 진행하였다.

연소실 내 분위기 온도는 카트리지 히터와 열전대 및 히터 컨트롤러를 이용하여 제어하였으며, 설정온도에서 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 오차를 갖는다.

연소실 내 분위기 압력을 1 MPa로 고정하고 연료 분사량의 설정을 위해 분위기 온도 별로 연소실 내 유입되는 공기의 질량을 계산 한 후 이론공연비인 14.7:1의 비율에 맞추어 연료 분사량을 설정하였으며 설정된 연료 분사량을 기준으로 연료 분사압력 별 인젝터 작동시

Table 1 Experimental condition

Bore(mm) × Width (mm)	86×39
Displacement (cm ³)	228
Ambient Pressure (MPa)	1
Ambient Temperature (K)	323, 333, 343, 353
Fuel Injection Pressure (MPa)	4, 5, 7, 9
Swirl Motor Speed (rpm)	500
Air/Fuel Ratio	14.7:1

간을 설정하였다. Table 1은 실험조건을 나타내고 있다.

3. 실험결과

3.1 연소 가시화

정적 연소기 내에서 분위기 온도와 연료 분사압력에 따른 연소특성을 실사촬영으로 파악했으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2의 0 ms는 스파크 방전시기를 기준으로 하였고, 10 ms의 간격으로 200 ms까지 표시하였다

연료분사압력이 낮은 경우 연료의 무화가 잘 이루어지지 않고 분위기 온도가 낮을 경우 기화되는 연료의 양이 적게 되는데, 그로 인해 연료분사압력이 낮고 분위기 온도가 낮은 조건에서는 연료의 무화와 기화가 잘 이루어지지 않아 액적상태의 연료가 연소되는 것을 볼 수 있었다. 또한 연료의 분포가 균일하지 못해 연소실 전체에 화염전파가 이루어지지 않는 것을 확인하였다.

연소 가시화 결과를 통해 연료분사압력과 분위기온도가 높을수록 점화지연시간이 짧아지고 화염전파속도가 빨라지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 연료분사압력 증가와 분위기 온도 상승이 연료의 무화와 기화를 잘 일어나도록 하여 균일한 혼합기가 형성되고 그로인해 화염핵 성장에 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다. 이는 선행연구를 통해서도 확인할 수 있는데, 김민규 등은 GDI 엔진 인젝터의 연료 분무 거동 및 액적 분포특성⁽⁷⁾을 통하여 연료의 분사압력 상승에 따라 분무액적의 평균지름이 감소한다고 밝혔으며 이기형 등은 가솔린 연료의 기화를 변화에 따른 연소특성에 관한 기초연구⁽⁸⁾를 통하여 분사된 연료의 주위온도가 낮을수록 연료의 기화율이 저하되어 연소압력과 연소속도가 감소된다고 밝혔다.

Fig. 2 Combustion visualization for each conditions

3.2 연소압력 및 열 발생률

Fig. 3~6의 0 ms는 스파크 방전시기를 기준으로 하였으며 이는 Fig. 2와 동일하다.

Fig. 3은 분위기 온도 323K 실험조건에서 연료분사압력에 따른 연소압력 및 열 발생률을 나타내고 있다. 분사압력 4 MPa의 실험조건에서는 연소가 일어나지 않았

Fig. 3 Combustion pressure and rate of heat release according to various injection pressure at ambient temperature 323K

는데, 이는 낮은 분위기온도와 분사압력으로 인해 연료의 기화 및 무화가 잘 일어나지 않아 스파크플러그 주변 혼합기의 공연비가 희박해짐에 따른 것으로 판단된다. 4 MPa 이상의 분사압력에서는 연소가 이루어졌으며, 분사압력이 높을수록 점화지연기간이 짧아지고 연소속도가 빨라지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 분위기 온도 333K일 때의 분사압력에 따른 연소압력 및 열발생률을 나타내고 있으며 모든 분사압력조건에 대해 323K의 경우보다 점화지연기간이 짧아지고 연소속도가 빨라진 것을 확인할 수 있다. 이 또한 분위기 온도 323K의 실험조건과 동일한 이유로 나타나는 현상으로 판단되며 분사압력 7 MPa, 분위기 온도 323K의 실험조건과 비교 시 점화지연기간은 75% 가량 감소하였고 연소속도는 25% 가량 증가하였는데, 이는 4 MPa와 5 MPa의 경우에는 낮은 분사압력으로 인해 무화가 활발하지 않아 연료액적의 크기가 크고, 액적의 표면적이 작아 분위기 온도 상승에 따른 기화를 상승이 크지 않기 때문인 것으로 판단되며, 9 MPa의 경우 이미 충분한 무화가 이루어져 단지 분위기 온도 상승에 따른 기화율의 차이만 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 분위기 온도 343K일 때의 분사압력에 따른

Fig. 4 Combustion pressure and rate of heat release according to various injection pressure at ambient temperature 333K

Fig. 5 Combustion pressure and rate of heat release according to various injection pressure at ambient temperature 343K

연소압력 및 열 발생률을 나타내고 있다. 마찬가지로 분위기 온도 증가에 따라 점화지연기간이 짧아지고, 연소속도가 빨라진 것을 확인할 수 있으며, 분위기온도 333K, 분사압력 7 MPa의 조건과 비교 시 점화지연기간과 연소속도에서 큰 차이를 보였던 분사압력 4 MPa, 5 MPa의 경우 분사압력 7 MPa의 조건과의 격차가 많이 줄어든 것을 확인할 수 있는데, 5 MPa의 조건과 비교 시 점화지연기간이 75% 감소하고 연소속도가 60% 가량 증가하였고 4 MPa의 조건과 비교 시 점화지연기간이 75% 감소하고 연소속도가 55% 가량 증가하였다. Fig. 2의 연소가시화를 참조하자면 343K에서는 정상적인 화염전파를 위한 혼합기가 연소실 내에 균일하게 존재하지만, 333K 이하의 분위기 온도조건에서는 이론공연비에 맞추어 연료를 분사하여도 낮은 분위기온도와 분사압력으로 인해 연료의 기화 및 무화가 활발하지 못해 정상적인 화염전파가 이루어지지 못함에 따른 것으로 판단된다.

Fig. 6은 분위기 온도 353K일 때의 분사압력에 따른 연소압력 및 열 발생률을 나타내고 있다. 분위기 온도 353K, 분사압력 4MPa의 조건에서는 분위기 온도 상승에 따라 점화지연기간이 길어지고 연소속도가 느려지는

Fig. 6 Combustion pressure and rate of heat release according to various injection pressure at ambient temperature 353K

Fig. 7 Maximum combustion pressure and rate of heat release according to various injection pressure and ambient temperature

경향을 보여주고 있는데, 이는 상대적으로 높은 온도에서 분사과정 중 기화되는 연료의 양이 많아지고 그에 따라 연료의 관통성이 떨어져 스파크 플러그 주변의 혼합기가 희박해짐에 의한 것으로 판단된다. 이에 대한 근거로 Fig. 2의 연소가시화를 참조하면 스파크 플러그를 기준으로 연소실 상부로 화염이 전파되는 것을 확인할 수 있으며, 참고문헌의 가솔린 연료의 증류곡선⁽⁹⁾을 확인해 보면 323K 대비 353K에서의 증류량이 25% 가량 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 각 조건별 최대 연소압력과 열발생률을 나타낸 것으로 분위기온도와 연료분사압력이 높을수록 최대 연소압력과 열발생률 모두 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

3.3 배출가스 특성

Fig. 8은 각 분위기 온도조건 및 연료분사압력에 따른 CO 배출률을 나타내고 있으며 분위기 온도 증가와 연

Fig. 8 CO emission according to various injection pressure and ambient temperature

Fig. 9 HC emission according to various injection pressure and ambient temperature

료분사압력 증가에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 연료분사압력 상승에 따라 분사된 연료의 미립화가 촉진되고 분위기온도 상승에 따라 연료의 기화가 촉진되어 공기와 접촉되는 면적이 넓어져 공기이용효율이 높아짐에 따라 불완전연소가 감소한 것으로 판단된다. 특히 연료분사압력이 높을수록 이러한 경향이 두드러지는데, 이는 연료액적이 공기와 닿는 면적이 넓을수록 연료의 기화가 활발해지기 때문으로 판단된다.

Fig. 9는 각 분위기 온도조건 및 연료분사압력에 따른 HC 배출률을 나타내고 있다. HC 배출률은 연료분사압력이 증가함에 따라 높아지며, 분위기 온도가 높을수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 분사압력 상승 시 연료의 관통력 증가로 연소실 하단 부분에 연료액적이 집중되는 현상이 발생되며 특히 분위기 온도가 낮을수록 액적형태로 존재하는 연료의 양이 많아져 HC 배출률이 늘어나는 것으로 보이며, 분위기온도 상승에 따라 연료의 기화가 활발히 일어나 국부적 농후지역이 줄어들고 연소속도가 증가함에 따라 HC 배출률이 줄어드는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 각 분위기 온도조건 및 연료분사압력에 따

Fig. 10 CO₂ emission according to various injection pressure and ambient temperature

Fig. 11 NO_x emission according to various injection pressure and ambient temperature

른 CO₂ 배출률을 나타내고 있으며 연료분사압력과 분위기 온도가 상승함에 따라 CO₂ 배출률이 증가하는 것을 볼 수 있다. CO₂는 혼합기의 완전연소에 의해 생성되기에 연료의 무화가 활발하고 기화율이 높을수록 배출률이 높아진다고 볼 수 있다.

Fig. 11은 각 분위기 온도조건 및 연료분사압력에 따른 NO_x 배출률을 나타내고 있으며 분위기온도와 연료분사압력의 상승에 의해 점진적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 기본적으로 NO_x 배출률은 공연비와 그에 따른 연소온도에 영향을 받게 되는데, Fig. 7의 최대 연소압력 및 열 발생률을 참고하면 분사압력 증가로 인해 연료의 무화가 촉진되어 연료 각 입자의 표면적 증가로 기화율이 증가하고 산소와의 반응이 용이해져 연소온도가 상승함에 따른 것으로 판단된다.

4. 결 론

가솔린 연료의 연소실 내 직접 분사 시 연료의 미립화 및 기화특성이 연소에 미치는 영향을 파악하기 위해서 정적연소기를 이용하여 연료분사압력과 분위기온도를 변화시켜가며 연소 가시화 및 연소압력과 배출가스 측정을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 연료 분사압력이 증가하면 연료의 무화가 활발히 진행되며 액적의 표면적 증가로 인해 연료의 기화를 촉진시키고 연소실 내 연료입자의 분포상태가 균일해짐을 확인하였다.
- 2) 연소실 내 분위기 온도 상승 시 연료의 기화율이 높아지며 연료의 미립화 상태가 좋을수록 그 상승폭이 커짐을 확인하였다.
- 3) 연소실 내 연료입자의 분포상태가 균일해짐에 따

라 연소 시 점화지연기간이 단축되고, 연소속도가 증가함을 확인하였다.

4) 연료 분사압력 증가에 따라 공기이용효율이 증가하여 CO 배출률은 낮아지며 CO₂ 배출률과 NO_x 배출률은 증가하였다. 이는 연소효율과 연소속도 증가에 의한 것으로 판단된다.

5) 연료 분사압력 증가에 따라 HC 배출률이 높아지는 것을 확인하였다. 이는 연료의 관통력 증가로 연소실 하단 부분에 연료액적이 집중되는 현상에 의한 것으로 판단된다.

6) 연소실 내 분위기 온도 상승에 따라 CO, HC의 배출률은 낮아지고 CO₂, NO_x의 배출률은 증가함을 확인하였다. 이는 연료의 기화율 상승에 의해 연소효율이 향상됨에 의한 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 인천대학교 2011년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

(1) 노수영, “GDI 엔진에서 미립화 특성”, 오토저널, 제

22권 제6호, 2000.12, page 22~29.

- (2) J. E. Kirwan., M. Shost., G. Roth and J. Zizelman, “3-Cylinder Turbocharged Gasoline Direct Injection : A High Value Solution for Low CO₂ and NO_x Emissions”, 2010 SAE International, 2010-01-0590.
- (3) Eom, D., Jung, J., Cho, Y., Baik, D., Lee, S., “Experimental Investigation of Measurement and Characteristic of Nano-Particle Emissions”, SAE Technical Paper, 2011-24-0190.
- (4) J. B. Heywood, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill, 1988, pp. 525~539.
- (5) 박정환, 박수한, 이창식, 박성욱, “분사 조건이 다공형 GDI 인젝터의 분무 거동에 미치는 영향”, Transactions of KSAE, Vol. 20 No. 2, 2012, pp. 116~122.
- (6) 박수한, 김형준, 서현규, 전문수, 이창식, “분위기 조건이 바이오디젤과 에탄올 혼합연료의 분무 거동 및 미립화 특성에 미치는 영향”, Journal of ILASS-Korea Vol. 13 No. 4, 2008, pp. 180~186.
- (7) 김민규, 이창식, 이기형, 진 다시양, “GDI 엔진 인젝터의 연료 분무 거동 및 액적분포 특성”, 한국액체미립화학회지, 제6권 제2호, 2001, pp. 16~21.
- (8) 이기형, 이창식, 신광수, 조행목, “가솔린 연료의 기화율 변화에 따른 연소특성에 관한 기초연구”, 한국액체미립화학회지, 제1권 제3호, 1996, pp. 29~36.
- (9) 이성렬, “내연기관”, 보성각, 1994, pp. 133~137.