

노즐 홀 직경에 따른 단공 GDI 인젝터의 분무 특성 연구 - (1) 분사 및 거시적 분무특성 비교

박정현* · 노승천** · 상몽소* · 박수한†

Study on Spray Characteristics of Single-Hole GDI Injector according to Nozzle Hole Diameter – (1) Comparison of Injection and Macroscopic Spray Characteristics

Jeonghyun Park, Seungcheon Ro, Mengzhao Chang and Suhan Park

Key Words: Gasoline direct injection(GDI, 가솔린 직접 분사), Single-hole injector(단공 인젝터), Injection rate(분사율), Bosch method(보쉬법), Mie-scattering(미 산란), Spray characteristics(분무특성)

Abstract

The purpose of this study is to compare the injection and spray characteristics of single-hole GDI injectors using injection rate and mie-scattering spray images. Five types of single-hole injectors with different nozzle hole diameters were used, and the spray rate, spray tip penetration, spray area, and spray width were analyzed. As a result, the diameter of the nozzle hole had a direct effect on the injection and spray characteristics. It was confirmed that the larger the diameter of the nozzle hole, the higher the injection quantity, the spray tip penetration, the spray area, and the spray width. In addition, it was confirmed that the near-field spray, which has little influence of ambient air, has a great correlation with the injection rate.

1. 서 론

세계 에너지 수요는 지속적으로 증가하고 있으며, 화석연료의 고갈과 환경파괴 또한 당면하고 있는 큰 사회적 문제이다. 화석연료는 운송수단의 주요 동력원이며, 운송수단에 의한 대기오염과 지구온난화를 줄이기 위하여 배출규제가 세계적으로 강화되고 있다. 강화되는 규제를 만족시키기 위한 방법 중 하나로 불꽃점화기관에서는 가솔린 직접 분사(gasoline direct injection, GDI) 기

술이 많은 관심을 받고 있다⁽¹⁾. GDI 엔진은 포트 연료 분사(port fuel injection, PFI) 엔진 보다 압축비를 높일 수 있고, 높은 체적 효율로 인해 출력이 증가하며, 높은 열효율로 인한 연비상승등의 많은 장점이 있다. 따라서 GDI 엔진은 5-10 % 정도의 연비 향상과 낮은 CO₂ 배출량의 장점을 가지고 있다⁽²⁻⁶⁾.

하지만 GDI 기술은 종래의 PFI 방식과 달라 새로운 분사 전략이 필요하며, 실린더 내 분무 발달에 대한 깊은 이해와 적절한 제어가 요구된다^(7,8). 현재 slit injector, outwardly-opening injector, swirl injector, multi-hole injector 등 많은 종류의 인젝터가 GDI 엔진을 위해 개발되고 적용되어 왔다⁽⁹⁾. 그 중 인젝터 노즐의 홀 설계와 배치 변경을 통해 분무 타겟팅 및 연료 분사 제어에 이점이 있으며, 가격이 저렴한 다공(multi-hole) 인젝터가 가장 많이 채택되어 개발되고 있다⁽¹⁰⁾.

다공 인젝터에 대한 연구 중 홀 직경의 영향에 대한

(Received: 6 Aug 2020, Received in revised form: 25 Sep 2020, Accepted: 25 Sep 2020)

*전남대학교 일대대학원 기계공학과

**현대케피코, 제품설계 2팀

†책임저자, 회원, 전남대학교 기계공학부

E-mail : suhanpark@jnu.ac.kr

TEL : (062)530-1674 FAX : (062)530-1689

연구는 오랜 기간 동안 폭넓게 연구되어 왔다. 초기의 전통적인 연구에서는 대부분 단공 디젤 인젝터의 노즐을 이용하였다⁽¹¹⁾. 최근에는 다공 노즐의 분무특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 단공노즐의 연구 결과를 바탕으로 다양한 분무예측모델을 만들어 왔다^(11,12). 그러나 다공 인젝터 노즐의 분무가 분무예측모델의 결과를 따르지 않는 경우가 많아 보다 심도있는 연구가 필요하다⁽¹³⁾. 다공 GDI 인젝터의 복잡한 홀 배치 및 디젤 인젝터와 다른 내부 구조(ball needle, sac volume 등)로 인해 기존 분무 모델을 적용하는 것에 어려움이 있어 다공 GDI 인젝터에 적용할 수 있는 분무 모델이 필요하다. 본 연구에서는 GDI 인젝터의 분무 모델을 개발하고 홀 직경의 최적화된 설계를 위한 기초 실험 데이터를 제공하고자 한다.

본 연구에서는 단공 GDI 인젝터를 채택하여 오리피스 직경에 따른 분사 및 분무특성을 분석하였다. 오리피스 직경은 110 μm부터 230 μm까지 30 μm단위로 총 5개의 서로 다른 오리피스 직경을 가진 GDI 인젝터를 가공하여 사용하였다. 오리피스의 직경 변화에 따른 인젝터의 분사 및 분무특성을 규명하기 위하여 Bosch법을 활용한 분사율 측정과, 미-산란(Mie-scattering) 기법을 활용한 분무영상을 촬영하였다.

2. 실험장치 및 방법

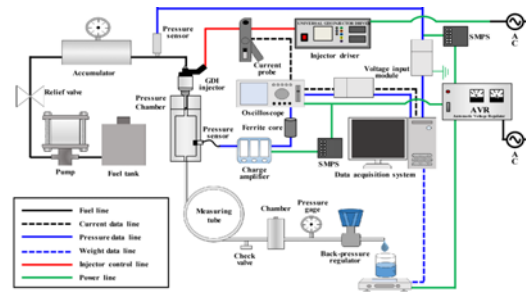
2.1 실험장치

분사율 실험 장치는 분사율 측정부, 데이터 취득부, 연료 공급부 등으로 구성되었으며, Fig. 1(a)에 나타내었다. 분사율 장치는 연료가 가득 채워진 측정관에 연료가 분사될 때, 관내부의 압력변화를 측정하는 Bosch법을 기반으로 제작되었다. 다양한 분사율 취득 방법 중에서 Bosch법은 분사율 취득의 정밀도와 신뢰도가 높아 가장 널리 사용되는 방법 중 하나이다⁽¹⁴⁾. 연료 공급을 위해 670 bar까지 가압할 수 있는 공압식 펌프 (Haskel, DSF-60)가 사용되었으며, 안정적인 분사압력을 유지하기 위해 1440 cc의 어큐뮬레이터(accumulator)를 설치하였다.

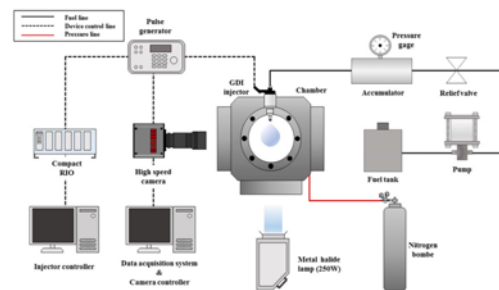
인젝터는 LabVIEW를 기반으로 한 인젝터 드라이버 CompactRIO Controller(NI, cRIO-9030), Differential Digital Input(NI, 9411), Injector controller(NI,9751)를 사용하여 제어하였으며, 분사 압력을 정밀하게 제어하기 위하여 연료고압호스 끝단에 압력센서(Sensys, PHP)를 설치하였다. 측정관은 길이 5 m, 직경 6.35 mm의 스테인리스

강관(SUS tube)를 이용해 제작하였고 측정관 내의 반사파를 줄이기 위한 체크 밸브를 설치하였으며, back pressure regulator(TESCOM, 26-1700 series)를 사용하여 관내압력을 설정하였다. 인젝터 드라이버로부터 구동되는 인젝터의 실제 전류를 측정하기 위해 current probe(Fluke, 80i-110s)를 사용하였다. 인젝터의 분사율을 분석하기 위해 연료를 관내에 분사하여 변화하는 압력 파형을 압력센서(Kistler, 4045A50V200S)를 이용하여 측정하였으며, 전류파형과 압력파형은 각각 Labview 프로그램을 연동하여 데이터를 취득하였다. 분사량 데이터는 설정된 관내 압력 이상에서 측정관 출구로 배출되는 연료의 양을 전자저울(CAS, CUW620HX)을 이용하여 측정하였다.

Fig. 1(b)는 거시적 분무 가시화 실험장치를 나타낸 개략도이다. 분무 가시화 실험은 분위기 압력을 형성할 수 있고, 주변 방해요소의 영향을 최소화할 수 있도록 정적 챔버 내에서 실험을 수행하였다. 정적 챔버의 상단에 GDI 인젝터 전용 마운트를 이용하여 GDI 인젝터를 설치하였으며, 4개의 가시화 창을 석영유리로 설치하여 챔버 내부를 촬영하였다. 거시적 분무영상은 고속 카메라(FASTCAM, Mini AX100)와 105 mm 렌즈(SIGMA, 105 mm f/1:2.8 DG MACRO HSM)로 취득하였다. 노즐



(a) injection rate measurement system



(b) Spray visualization system

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

팁 근처 분무의 이미지는 Extension tube를 사용하여 보다 자세한 사진을 취득하였다. 250 W 메탈 할라이드 램프(MID-25FC)를 광원으로 사용하여 정적 챔버의 측면에서 조사하였다. GDI 인젝터는 LabVIEW를 사용한 인젝터 드라이버로 제어하였으며, 신호 생성기(Berkeley Nucleonics Corp, model 575)를 사용함으로써 인젝터와 고속 카메라를 동기화하여 영상을 취득하였다.

2.2 실험 조건 및 방법

모든 실험은 실온(분위기 온도 25°C)에서 수행되었으며, 통전시간은 GDI 분사 및 분무실험에서 대표적으로 널리 사용되는 1.5 ms로 고정하였다. 분사량 및 분사율 측정실험은 분사압력 50-200 bar(50 bar 단위로 측정), 관내압력 5, 15 bar로 변화시키며 각 조건마다 300회의 분사율을 취득하여 평균 데이터를 이용하였다. 거시적 분무가시화 실험은 분사압력 100, 200 bar, 분위기압력 5, 15 bar로 설정하고 실험을 진행하였다. 초고속 카메라의 Frame rate와 노출 시간은 각각 10,000 fps, 1/10,000 s로 설정하였다. 각 분사 조건마다 3회를 진행하여 평균 데이터를 이용하였다.

실험으로부터 얻어진 거시적 분무가시화 영상은 MATLAB을 기반으로 제작한 영상 후처리 코드를 이용하여 Fig. 2의 순서로 후처리하였다. 먼저 원본 영상에서 분무를 제외하고 불필요한 배경을 제거한다. 그 후 배경이 제거된 이미지를 흑백 변환하고, 분무영상을 정량적으로 분석하기 위해 문턱치(threshold) 값을 지정하여 이미지를 이진화한다. 마지막으로 이진화를 통해 얻

어진 이미지의 노이즈를 제거하기 위해 필터링 작업을 거쳐 후처리된 분무영상을 취득한다. 후처리된 영상을 MATLAB 기반으로 제작된 영상분석 코드를 사용하여 정량적 데이터(분무도달거리, 분무 너비, 분무면적, 분무중심 등)를 취득하였다.

이 연구에서는 단공 GDI 인젝터의 분사 및 분무 특성 분석을 위해 가솔린 대신 n-heptane을 사용하였으며, Table 1에 연료의 물성을 표시하였다. 다성분 연료인 가솔린과 달리 n-heptane은 단일 성분 연료로서 분무의 균일도가 높고, 가솔린의 물리적 특성(밀도, 점도, 표면장력)과 비슷하기 때문에 연구에 적합하다고 판단하였다. 또한, SAE(society of automotive engineering)에서 제시한 가솔린 인젝터의 분무 측정 평가 기준에서도 분무 실험의 연료로 n-heptane을 추천하고 있다⁽¹⁵⁾.

Table 1 Fuel properties of test fuel

	Gasoline	n-heptane
Molecular formula	C _{6.97} H _{14.02}	n-C ₇ H ₁₆
Molecular weight	-	100.2
Density [g/cm ³ @20°C]	0.746	0.682
Viscosity [cSt]	0.55	0.689
Surface tension [mN/m]	21.3	20.53
Lower heat value [MJ/kg]	44.1	44.566
Latent heat [kJ/kg]	310-340	316
Octane number	95	-

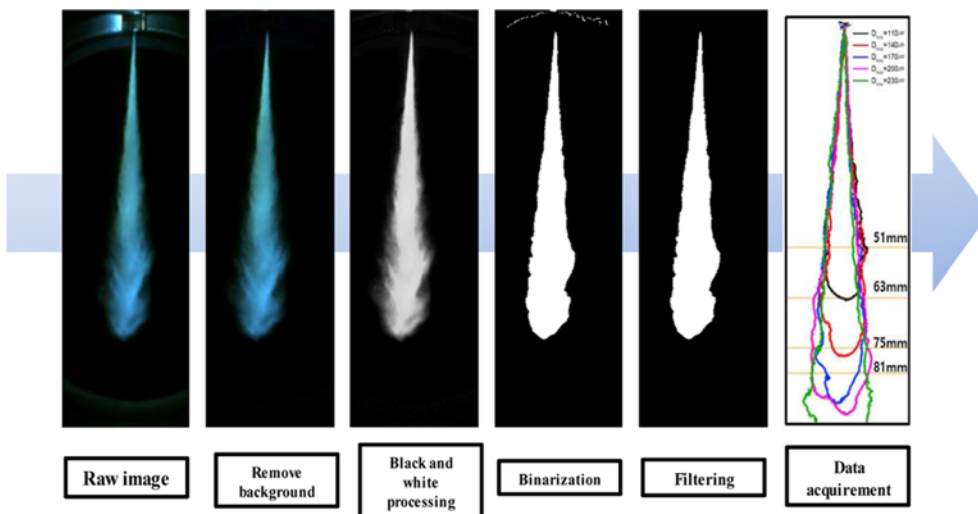


Fig. 2 Post-processing sequence of visualization images using MATLAB

3. 결과 및 고찰

3.1 분사특성 분석

Figs. 3-5는 다양한 분사 조건에서 인젝터 오리피스 직경에 따른 분사량 및 분사율 특성을 비교한 그래프이다. Fig. 3은 통전 시간을 1.5 ms로 고정하고 인젝터 오리피스 직경에 따른 분사량을 나타낸 것으로 오리피스 직경이 커질수록 분사량이 증가하였고, 또한 분사압력이 커질수록 분사량이 증가함을 확인하였다.

$$\dot{m} = \rho_f \cdot A_n \cdot V \tag{1}$$

$$\frac{P_1}{\rho_f} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho_f} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \tag{2}$$

$$Q_{dyn} = C_d \cdot A_n \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P}{\rho_f}} \cdot t_{eng} \tag{3}$$

식 (3)은 질량 유량 방정식 (1)과 베르누이 방정식 (2)을 이용하여 도출된 인젝터의 이론적인 분사량을 나타낸 것이다. 오리피스 직경 및 분사압력이 커질수록 분사량이 증가하는 것은 식 (3)에서 확인할 수 있으며, 이에 따라 분사압력 200 bar 기준 오리피스 지름 30 μm 증가 시 분사량은 평균 1.13 mg 증가하였다. 또한 식 (3)에 따르면 분사 압력과 대기압의 차이가 분사량을 결정짓는 주요한 변수로 작용한다. 분위기 압력은 분사압력보다 비교적 작기 때문에 분위기 압력 차이로 인한 분사량의 변화는 크지 않은 것으로 나타났으며, 이에 따라 분위기 압력이 5 bar에서 15 bar로 증가할 경우 분사량은 평균 1.3% 감소하였다.

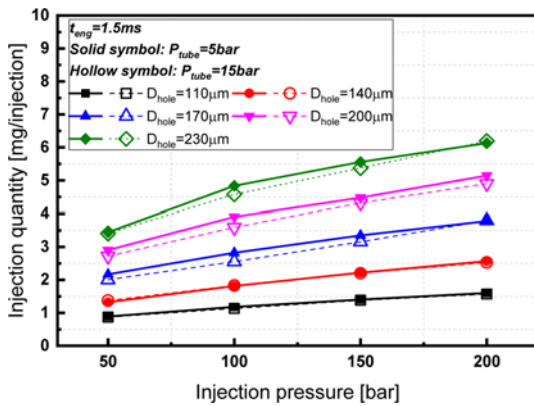


Fig. 3 Injection quantity according to nozzle orifice diameter change ($P_{inj}=200$ bar)

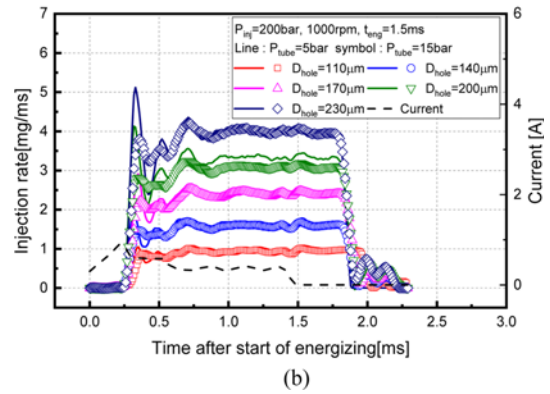
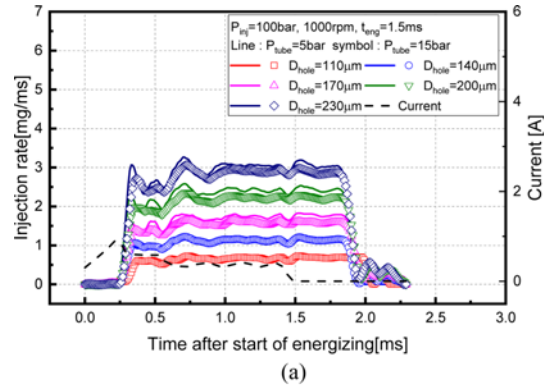


Fig. 4 Injection rate at injection pressure of 100 bar and 200 bar

Fig. 4는 오리피스 직경에 따른 분사율을 비교 분석한 그래프이다. 오리피스 직경이 커질수록 분사되는 분사량이 많아지기 때문에 분사율의 그래프 면적이 상승하였다. 마찬가지로 분사압력의 상승도 분사량의 증가를 가져오므로 분사율 그래프의 면적이 증가하는 것을 확인하였다. 분위기압력의 증가는 분사량에 미미한 영향을 미치며 분사율 면적도 소폭 감소하였다. 인젝터 오리피스의 직경 변화는 인젝터 니들의 분사지연에 큰 영향을 미치지 못하였지만, 분사압력은 인젝터 니들 거동에 영향을 미치는 것을 Fig. 5를 통해 확인할 수 있다. Opening delay는 인젝터 내부의 강한 자력으로 인하여 니들의 거동이 연료의 압력에 영향을 받지 않아 항상 같은 시기에 개방되었다. 하지만 Closing delay에서 인젝터 내부의 자력이 제거되고 자연적인 스프링의 힘으로 되돌아오는 니들은 연료의 압력에 영향을 받아 높은 압력일수록 니들을 누르는 힘이 강해져 Closing delay가 감소하는 것을 확인하였다^(16,17).

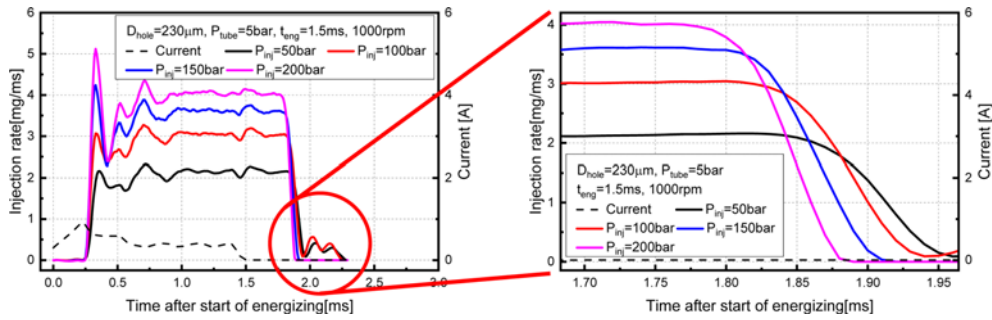


Fig. 5 Injection rate at nozzle orifice diameter 230μm and comparison of injection closing according to injection pressure change

3.2 분무특성 분석

단공 GDI 인젝터의 거시적 분무 특성 분석을 위해 미산란(Mie-Scattering) 기법을 이용하여 분무 형상을 가시화하였다. 미산란 기법을 활용하여 얻어진 분무영상을 이용하여 분무도달거리, 분무면적, 분무너비와 같은 분무특성을 정량적으로 분석하였다. 분무도달거리는 인젝터 노즐 팁으로부터 가장 멀리 있는 점까지의 최대 직선거리로 정의하고, 분무면적은 분무액적에 해당하는 흰색 영역이 차지하는 전체영역으로 정의하였다. 분무

너비는 인젝터 팁으로부터 등 간격으로 임의의 측정점을 선정하고 측정점에 도달한 분무액적의 왼쪽 끝부터 오른쪽 끝까지의 길이로 계산하였다. 또한 노즐 팁 근처 분무의 발달을 관찰하기 위해 렌즈에 Extension tube를 추가적으로 장착하여 작은 면적의 분무 영상을 취득하였다.

Fig. 6은 오리피스 직경에 따른 분무 발달 과정을 비

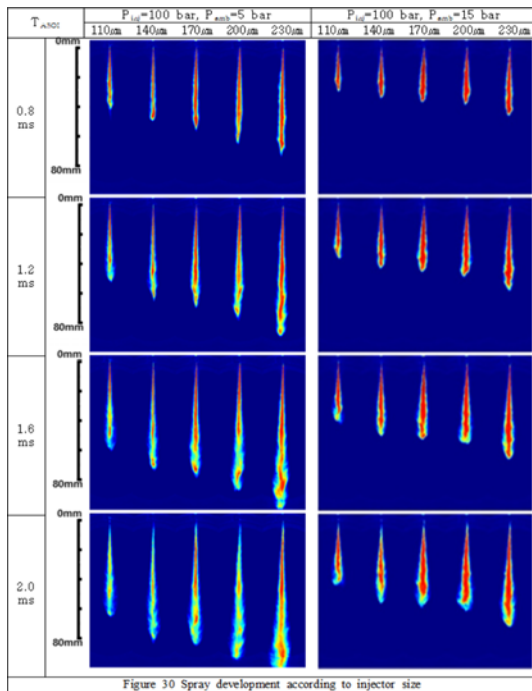


Fig. 6 Color map spray image of single-hole GDI injectors

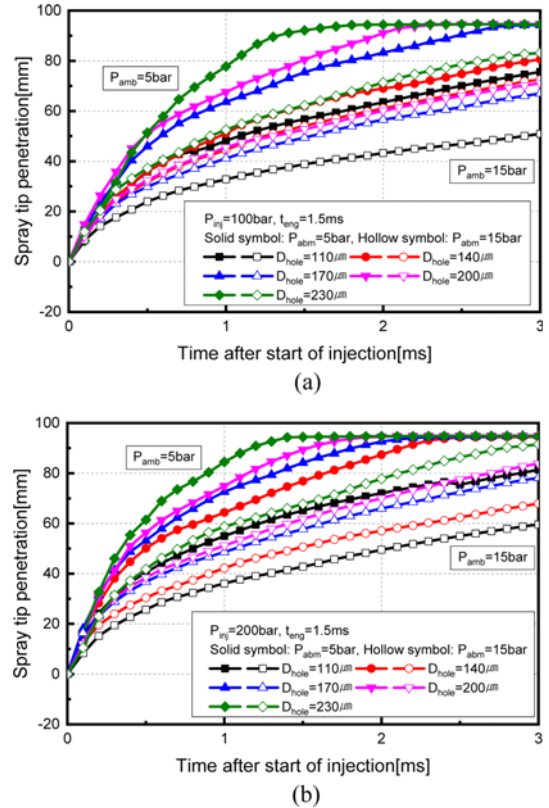


Fig. 7 Spray tip penetration of single-hole GDI injectors at injection pressure of 100bar and 200bar

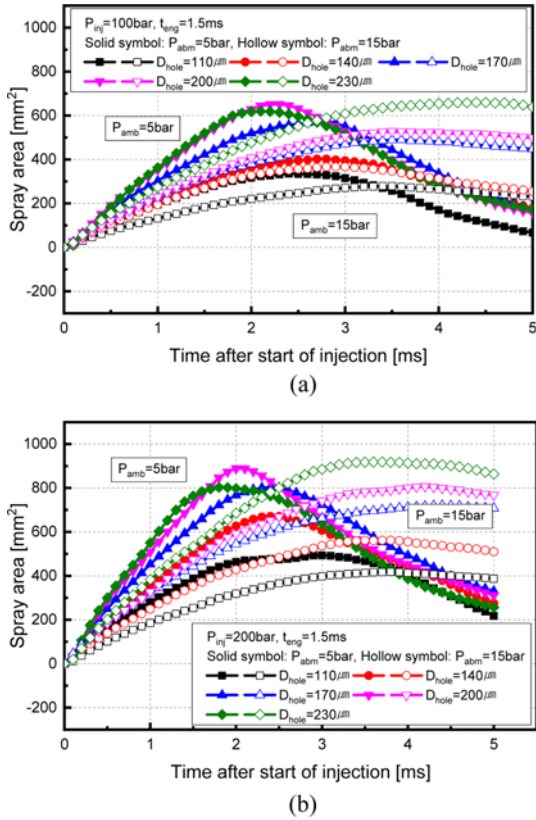


Fig. 8 Spray area of single-hole GDI injectors at injection pressure of 100 bar and 200 bar

교한 것이다. 높은 밀도의 분무 영역은 빨간색, 낮은 밀도의 분무영역은 파란색으로 표시하였다. 인젝터 오리피스 직경이 증가하면 분무 도달 거리가 크게 증가하고, 분위기 압력이 증가하면 분무도달거리가 크게 감소하는 것을 정성적으로 확인할 수 있었다^(18,19). 그러나 분위기 압력은 분사량에 영향을 크게 미치지 못해 비슷한 양의 연료가 분사되며, 높은 분위기압력에서 분무가 발달하지 못하고 분무 중심부의 연료 농도가 증가하였다. 또한 높은 분위기 압력에서는 분무의 축 방향 전개를 방해하는 힘이 커지고, 이에 따라 좌우로 발달하는 액적의 수가 많아지게 되어 분무 너비가 증가한 것으로 판단된다.

Figs. 7-9에서 분무 영상 데이터를 정량적으로 추출하여 분석한 결과를 나타내었다. Fig. 7은 분사압력 100 bar 및 200 bar에 대하여 노즐 오리피스 직경 변화에 따른 분무도달거리를 각각 나타낸 것이다. 인젝터 오리피스의 직경이 증가함에 따라 분무도달거리가 증가하였다.

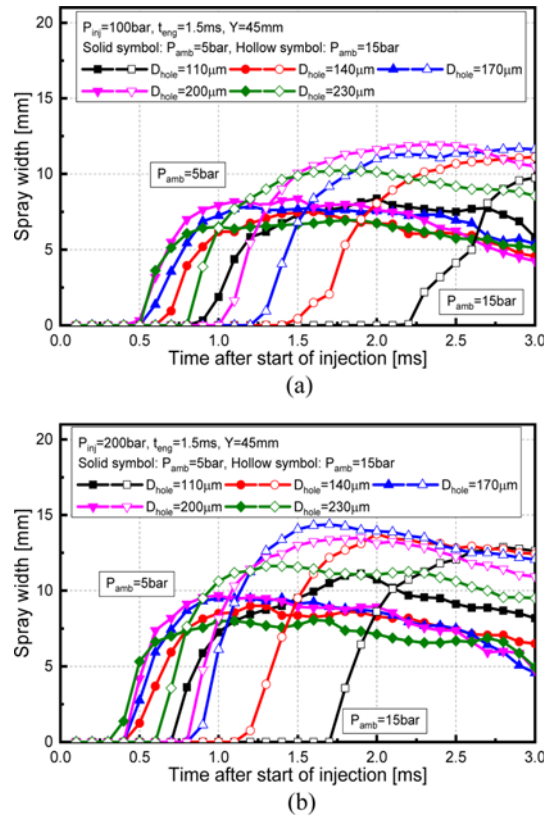


Fig. 9 Spray width of single-hole GDI injectors at injection pressure of 100 bar and 200 bar

Dent^[20]의 분무예측모델(식 (4))에 따라 분무도달거리는 홀 직경의 제곱근에 비례하며, 홀 직경이 증가할수록 분무도달거리가 증가하는 것으로 판단된다. 분사 시작 후 시간($t_{a,soi}$)이 1.0 ms일 때, 오리피스 직경이 30 μm 증가하면 분무도달 거리가 평균 6.16 mm씩 증가하였다. 또한, 분사압력이 증가함에 따라 액적의 운동에너지가 증가하며 분무도달거리가 증가하였다. 분사압력이 100 bar에서 200 bar로 증가할 때, 분무도달거리는 약 26.4%씩 증가하였다. 분위기 압력은 분사량 및 분사율 특성에 큰 영향을 끼치지 못했지만, 분무특성에서는 다른 결과를 보여주었다. 분위기 압력의 증가는 분무도달거리를 급격하게 감소시켰으며, 분위기압력이 5 bar에서 15 bar로 증가할 때 최대 분무도달거리가 약 32%까지 감소하였다.

$$S = 3.07 \cdot \left(\frac{294}{T_a}\right)^{1/4} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_a}} \cdot d_0 \cdot t \quad (4)$$

Fig. 8은 분사되는 분무의 정사영한 2D 면적을 정량

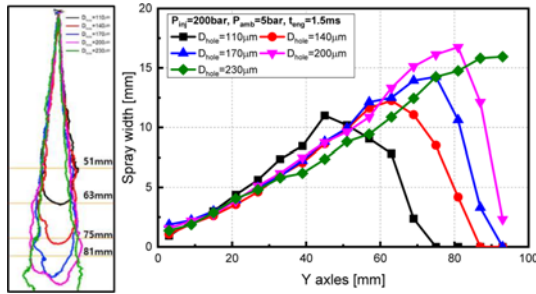
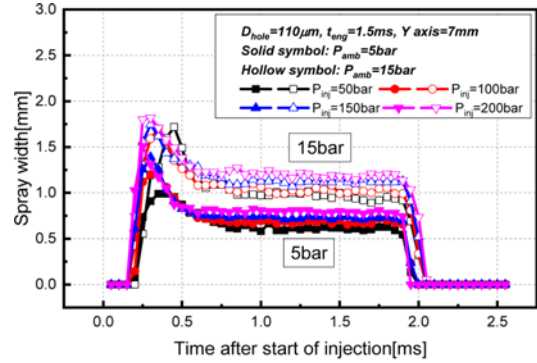


Fig. 10 Spray width in spray axis direction (Y axes)

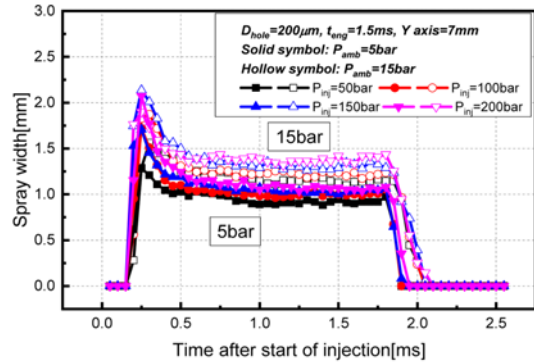
적으로 나타낸 그래프이다. Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 오리피스 노즐 직경과 분사압력의 증가에 따라 같은 시점의 분무 면적은 더 넓고 빠르게 증가하지만, 최대 분무 면적에 도달 후 빠르게 다시 감소하였다. 이것은 분무가 발달하면서 액적들 사이의 거리가 멀어지고 증발함에 따라 연료의 분포밀도가 낮아져 분무면적이 감소한 것으로 판단된다. 분위기 압력 15 bar에서는 분무의 연료 밀도가 높고 느리게 발달하면서 분무 면적이 서서히 감소하는 것을 확인하였다. 분사압력 100 bar, t_{aso} 가 2 ms일 때 오리피스 직경이 100 µm에서 230 µm으로 증가함에 따라 분무 면적이 약 1.85배 까지 증가하였다. 또한, 분사압력이 100 bar에서 200 bar로 증가하였을 때 분무 면적은 약 1.7배 상승하였다.

Fig. 9는 분사압력 100 bar와 200 bar에서 인젝터 오리피스 직경의 변화에 따른 분무 너비를 시간에 따라 나타낸 것이다. 모든 분사 조건에서 오리피스 직경이 증가함에 따라 최대 분무 너비에 도달하는 시간이 짧아졌으며, 최대 분무 너비는 노즐 오리피스의 직경이 변화하여도 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 분무 면적과 마찬가지로 분위기 압력이 증가함에 따라 분무 너비가 증가하였는데⁽²¹⁻²⁵⁾, 분위기 압력이 5 bar에서 15 bar로 상승함에 따라 분무 너비는 평균 약 41.6% 증가하였다. 또한 분사 후 시간 2.0 ms에서 분사압력이 100 bar에서 200 bar로 증가함에 따라 분무 너비는 최대 약 1.6배 넓어졌다.

Fig. 10은 동일한 t_{aso} 조건에서 인젝터 각각의 분무 영상을 중첩한 것이다. 인젝터 오리피스 직경이 110 µm부터 200 µm까지 증가할 때 최대 분무 너비가 발생하는 지점이 점점 인젝터 노즐팁으로부터 멀어지는 것을 확인할 수 있다. 오리피스 직경 230 µm의 경우 정적 챔버의 가시창 크기의 한계로 인하여 최대 지점을 측정하지 못하였다. 오리피스 직경의 크기가 30 µm 증가하면 최



(a)



(b)

Fig. 11 Spray width near injector nozzle tip at nozzle orifice diameter 110 µm and 200 µm

대 분무 너비의 위치는 약 12 mm정도 이동하였으며, 분무 너비는 최대 18%가 증가하였다. 홀 직경이 커질수록 하류(인젝터 팁 아래 20-45 mm)의 분무 너비가 감소하는 경향을 나타냈다. Hiroyasu 등⁽²⁾의 연구 논문에 따르면, 인젝터의 홀 직경이 증가할수록 분무의 분열 길이 (break-up length)가 증가하여 반경 방향에서 분무의 확산을 억제하여 분무 너비를 감소시킨다.

Fig. 11은 다양한 분사압력과 분위기 압력 조건에서 오리피스 직경 110 µm와 200 µm의 노즐 팁 근처 분무 너비를 보여준다. 노즐 팁 근처 분무 너비는 분사압력 및 분위기 압력이 클수록 증가하는 것을 확인할 수 있다. 오리피스 직경 200 µm의 분무 너비는 분위기 압력이 5 bar에서 15 bar까지 증가함에 따라 26%까지 상승하였다. 노즐 팁으로부터 7 mm 떨어진 측정지점에서 각 인젝터의 분무 너비의 차이는 0.1-0.2 mm였으나 측정지점이 멀어질수록 분무 너비의 차이는 커졌다.

Fig. 11에서 나타낸 노즐 팁 근처 분무 너비의 그래프 형상은 Fig. 4의 분사율 그래프 곡선과 유사한 형태로

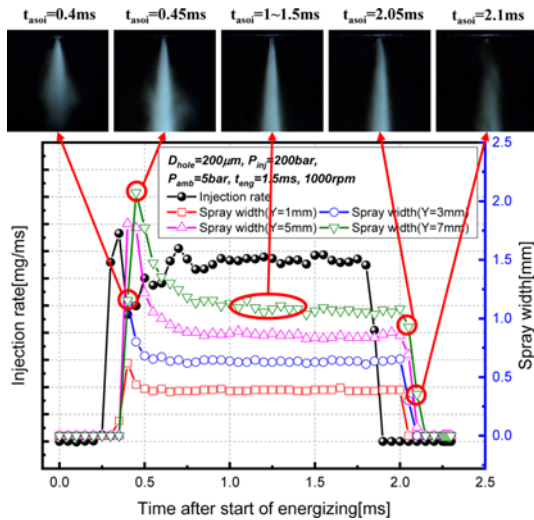


Fig. 12 Spray width near injector nozzle tip at nozzle orifice diameter 110 μm and 200 μm

나타났으며, Fig. 12에서 이 두 특성의 상관관계를 분석하였다. 노즐 팁으로부터 거리를 1 mm부터 7 mm까지 2 mm 단위로 증가시키며 분무 너비를 측정하였다. 분무의 안정구간($t_{\text{aso1}}=1\sim 1.5$ ms)에서 측정 지점이 2 mm 씩 증가할수록 분무 너비는 약 0.23 mm 씩 증가하였다. 분사율 그래프와 분무 너비 그래프의 증가 시점의 차이는 약 0.05 ms로 확인되었다. 인젝터 니들이 열려 분사율이 최대에 도달하는 시간은 분무 너비가 초기에 최대가 되는 형상과 아주 유사하게 나타났다. 인젝터의 니들이 열려있어 분사율이 안정되는 구간이 존재하는 것처럼 분무 너비도 안정되는 구간이 존재하였으며, 인젝터 니들이 닫히는 구간 또한 정확히 일치하는 것을 확인하였다. 이는 인젝터 노즐 팁 근처의 분무에 한정지어, 분무의 액적들이 강한 운동에너지를 가지고 발달하고 있으며 주변 공기의 영향을 적게 받은 상황에서는 분사율의 특성이 분무특성과 큰 상관관계를 가지는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 다공 인젝터의 단일 분무 플럼 특성을 파악하기 위해 다양한 오리피스 직경의 단공 인젝터를 사용하여 분사 및 분무특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 인젝터의 오리피스 직경이 커질수록 분사량 및 분

사율은 증가하며, 분사압력 200 bar 기준 오리피스 직경이 30 μm 증가 시 분사량은 평균 1.13 mg 증가하였다.

- (2) 오리피스의 직경은 거시적 분무특성(분무도달거리, 분무면적 및 분무 너비)에 직접적인 영향을 미쳤으며, 분사압력 200 bar 및 분위기 압력 15 bar 기준, 분사 시작 후 1 ms에는 오리피스 직경이 30 μm 증가하면 분무도달거리가 평균 5.67 mm 씩 증가하고 분무면적이 평균 91.59 mm^2 씩 증가하며, 분무 너비가 평균 2.66 mm 씩 증가하였다.

- (3) 노즐 팁 근처의 분무 특성은 주변 공기의 영향을 받기 전, 분무 액적이 큰 운동에너지를 가지고 발달하며, 분무가 발달하는 구간에서는 분무 너비 및 분사율 특성의 상관관계가 큰 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단의 지원(No.2019002070001)과 한국연구재단 중견연구자지원사업(2019R1A2C10 89494)에 의해 수행되었으며, 지원 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Rakesh Kale and R. Banerjee, "Experimental investigation on GDI spray behavior of iso-octane and alcohols at elevated pressure and temperature conditions", *Fuel*, Vol. 236, 2019, pp. 1~12.
- (2) M. Costa, L. Allocca, A. Montanaro, U. Sorge and B. Iorio, "Multiple Injection in a Mixed Mode GDI Boosted Engine", SAE International, 2012.
- (3) M. Costa, L. Allocca, A. Montanaro and U. Sorge, "Reduction of Duel Consumption of a GDI Engine by Split Injections", ILASS-Europe, 2011.
- (4) J. H. Park, S. H. Park, C. S. Lee and S. Park, "Effect of Injection Condition on the Spray Behaviors of the Multi-hole GDI Injector", *Transactions of KSAE*, Vol. 20, No. 2, 2012, pp. 116~122.
- (5) Haoyi Song, Jin Xiao, Yuyang Chen and Zhen Huang, "The effects of deposits on spray behaviors of a gasoline direct injector", *Fuel*, Vol. 180, 2016, pp. 506~513.
- (6) Annegret Uberall, Roderich Otte, Peter Eilts and Jürgen Krahl, "A literature research about particle emissions from engines with direct gasoline injection and

- the potential to reduce these emissions”, *Fuel* 147, 2015, pp. 203~207.
- (7) F. Zhao, D. L. Harrington and M. C. Lai, “Automotive Gasoline Direct-Injection Engines”, SAE International, 2002.
- (8) Seoksu Moon, Keisuke Komada, Kiyotaka Sato, Hideaki Yokohata, Yoshitaka Wada and Nobuhiro Yasuda, “Ultrafast X-ray study of multi-hole GDI injector sprays: Effects of nozzle hole length and number on initial spray formation”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 68, 2015, pp. 68~81.
- (9) N. Balasubramanian, S. Bakshi and T. N. C. Anand, “Fuel injection rate measurement of gasoline direct injection (GDI) injectors”, *ICLASS August*, 2015, pp. 23~27.
- (10) L. Postrioti, G. Buitoni, F. C. pesce and Ciaravino, “Zeuch method-based injection rate analysis of a common-rail system operated with advanced injection strategies”, *Fuel*, Vol. 128, 2014, pp. 188~198.
- (11) Siebers, Dennis L. “Liquid-phase fuel penetration in diesel sprays”, *SAE transactions* (1998), 1205~1227.
- (12) Hiroyasu, Hiro, and Masataka Arai. “Structures of fuel sprays in diesel engines”, *SAE Transactions* (1990), 1050~1061.
- (13) Payri, Raul, et al. “An experimental study of gasoline effects on injection rate, momentum flux and spray characteristics using a common rail diesel injection system”, *Fuel* 97 (2012), 390~399.
- (14) W. Bosch, “The fuel rate indicator: a new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection”, *SAE Technical Paper*, SAE 600749, 1966.
- (15) “Gasoline fuel injector spray measurement and characterization”, *SAE J2715*, 2007.
- (16) Jeonghyun Park, Dalho Shin and Su Han Park, “Study on the Injection Characteristics using Injection Rate in a Direct-injection Gasoline Injector with Multi-hole”, *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 21, No. 1, 2016, pp. 20~28.
- (17) I. S. Jo, J. H. Lee and J. W. Lee, “Analysis of Fast Injection Response Characteristics Between Solenoid and Piezo-Driven Injector”, *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 36, No. 10, 2012, pp. 971~977.
- (18) J. Tian, M. Zhao, W. Long, K. Nishida, T. Fujikawa and W. Zhang, “Experimental study on spray characteristics under ultra-high injection pressure for DISI engines”, *Fuel*, Vol. 186, 2016, pp. 356~374.
- (19) R. Payri, A. Garcia, V. Domenech, R. Durrett and A. H. Plazas, “An experimental study of gasoline effects on injection rate, momentum flux and spray characteristics using a common rail diesel injection system”, *Fuel*, Vol. 97, 2012, pp. 1189~1192.
- (20) Dent, J. C. “A basis for the comparison of various experimental methods for studying spray penetration”, *SAE Transactions* (1971), 1881~1884.
- (21) Hengjie Guo, Xiao Ma, Yanfei Li, Shuai Liang, Zhi Wang, Hongming Xu and Jianxin Wang, “Effect of flash boiling on microscopic and macroscopic spray characteristics in optical GDI engine”, *Fuel*, Vol. 190, 2017, pp. 79~89.
- (22) Zhou Zhanga, Yanfei Lia, Xiao Maa, Haichun Dinga, Hongming Xua, Zhi Wang and Shijin Shuaia, “Characteristics of trans-critical propane spray discharged from multi-hole GDI injector”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 99, 2018, pp. 446~457.
- (23) Jianwei Zhoua, Yiqiang Peia, Zhijun Pengb, Yanfeng Zhanga, Jing Qina,c, Li Wangd, Changwen Liua and Xiaoyu Zhanga, “Characteristics of near-nozzle spray development from a fouled GDI injector”, *Fuel*, Vol. 219, 2018, pp. 17~29.
- (24) B. Wang, Y. Jiang, P. Hutchins, T. Badawy, H. Xu, X. Zhang, A. Rack and P. Tafforeau, “Numerical analysis of deposit effect on nozzle flow and spray characteristics of GDI injectors”, *Applied Energy*, Vol. 204, 2017, pp. 1215~1224.
- (25) Raul Payri, Gabriela Bracho, Jaime Gimeno and Abian Bautista, “Rate of injection modelling for gasoline direct injectors”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 166, 2018, pp. 424~432.
- (26) Hiroyasu, Hiro, and Masataka Arai, “Structures of fuel sprays in diesel engines”, *SAE transactions* (1990), 1050~1061.