

분무패턴 분석을 이용한 가솔린 직접 분사식 인젝터의 개별 분무플럼 분무각 측정 방법에 대한 연구

박정현* · 조한빈** · 박수한†

A Study on the Measurement of Individual Spray Cone Angle from Gasoline Direct Injection Injector using Spray Pattern Analysis

Jeonghyun Park, Hanbin Cho, and Suhan Park

Key Words: Gasoline direct injection(GDI, 가솔린직접분사), Spray characteristic(분무특성), Spray angle(분무각), Individual spray plume(개별 분무), Spray pattern(분무 패턴)

Abstract

The purpose of this study is to propose and compare methods for measuring individual spray cone angles using spray cross-section images. In direct injection gasoline engines, it was believed that the distribution of air-fuel mixture in the combustion chamber directly affected combustion performance and emission formation. However, since gasoline direct injection (GDI) injectors have a small injection angle, interference between individual spray plumes occurs. Therefore, GDI injectors have only measured the spray angle of the entire spray. To overcome these limitations, three methods of indirectly measuring the spray cone angles of individual spray plume were presented and compared by forming sheet beams using Nd:YAG laser and acquiring spray cross-section images. Each method currently has advantages and disadvantages, and research to apply the method suitable for various GDI injectors needs to be continued.

1. 서 론

가솔린 엔진은 디젤 엔진에 비해 질소산화물 배출량이 적고, 이론공연비 연소와 삼원촉매의 적용으로 공해 물질 배출이 적은 편이다. 가솔린 직접분사식(gasoline direct injection, GDI) 엔진은 포트분사식(port fuel injection, PFI) 엔진과 달리 연소실 내부에 연료를 직접분사하고 비교적 높은 압축비에서 연소를 할 수 있기 때문

에 적은 배출가스와 높은 연비를 가지는 장점이 있다. 그러나 GDI 엔진은 연소실 내에 연료를 직접 분사하여 혼합기가 형성될 시간이 짧고, 디젤 엔진에 비하여 분사 압력이 낮아 분사된 연료의 미립화가 잘 되지 않기 때문에 연소실 내 불균일한 혼합기가 형성되는 단점이 있다. 불균일한 혼합기로 인해 연소실 내 당량비 분포가 고르지 못하게 되고, 엔진 노킹 발생 및 입자상 물질(particulate matter, PM) 생성의 원인이 되기도 한다. 따라서 연소실 내 균일 혼합기 형성과 연료 미립화를 통한 엔진 효율 향상을 위해 다단 분사의 적용과 같은 분사전략 최적화⁽¹⁻²⁾ 및 초고압 분사⁽³⁻⁵⁾ 등과 같은 다양한 연구가 진행되고 있다.

연소 효율 향상과 배출물 저감을 위한 분무특성 연구는 오래전부터 진행되어 왔다. 거시적 분무특성에 대한 연구에서는 주로 분무의 가시화와 영상 분석을 통해 분

(Received: 11 Nov 2019, Received in revised form: 4 Dec 2019, Accepted: 8 Dec 2019)

*전남대학교 일반대학원 기계공학과

**전남대학교 기계공학부

†책임저자, 회원, 전남대학교 기계공학부

E-mail : suhanpark@jnu.ac.kr

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

무 도달 거리, 분사각, 분무면적, 분무 중심 등을 분석하였다. 미시적 분무 특성 연구에서는 위상 도플러 속도 측정 기법(phase doppler anemometry, PDA) 또는 입자 영상 유속계(particle image velocimetry, PIV) 등을 이용하여 액적의 크기 및 속도를 측정하거나 X-ray를 이용해 분무 액적의 미립화 정도를 직접 분석하는 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.

Table 1은 최근 수행된 GDI 인젝터의 분무 특성 과 관련한 연구들을 정리한 표이다. GDI 인젝터의 분무 특성 분석을 위해 다양한 실험조건(분사압력, 분위기압력, 통전기간 등)과 실험기법(two-phase PIV, PDA, Mie-scattering method), 해석연구, 다양한 실험연료(가솔린, 이소옥테인, 노멀헵테인, 에탄올)를 이용하는 것을 확인

할 수 있으며, 이들을 이용하여 분무도달거리, 분사형상, 분사속도 및 액적크기, 분무패턴 분포, 분사율과 같은 거시적, 미시적 분무특성을 측정/분석하고 있다.

Mojtabi 등⁽⁹⁾은 다양한 압력과 온도조건에서 플래시 보일링이 분사각에 미치는 영향을 연구하였고, Befrui 등⁽¹⁰⁾은 CFD로 시뮬레이션 한 분무와 실제 분무와의 분사각 차이에 대하여 연구하였다. 일반적으로 분무각에 대한 연구는 전체 분무각에 대한 연구가 주로 이루어지고 있는데, 이는 GDI 인젝터 분무의 비대칭적인 형상과 분무 사이의 간섭으로 인해 개별 분무각을 측정하기 어렵기 때문이다.

그러나 앞서 언급한 바와 같이 계속해서 강화되는 배기 규제를 만족시키기 위해서는 분무 타겟팅의 최적화

Table 1 Research trends on spray and atomization characteristics of GDI injectors

Reference	Authors	Experimental conditions			
		Injector	Fuel	Experimental method	Acquisition data
2	T. Lee	GDI Injector	Gasoline	-	Spray shape Penetration
3	J. H. Kim	2hole-2stream 4hole-1stream	n-Heptane	Shadow-graphy Schlieren Patternator	Spray angle
4	M. K. Yoon	6-hole	Gasoline	Mie scattering Fraunhofer diffraction	Mass distribution Spray cone angle
5	G. Rottenkolber	-	Gasoline	two-phase PIV	Air/fuel equivalence ratio
6	M. S. Chon	High pressure swirl injector	Gasoline	Mie-Scattering PDPA	Spray Penetration, Mass flow rate
7	N. Mitroglou	6-hole	Iso-octane	-	Internal nozzle flow, Near-nozzle field spray characteristics
8	S. Alfuso	6-hole	Gasoline	PDA system	Droplet velocity, Droplet diameter
9	M. Mojtabi	Cone angle 60°, 90° injector	RON-95 Gasoline	Mie-scattering, CFD	Spray penetration, Spray cone angle
10	B. Befrui	6-hole	n-Heptane fuel	-	Plume trajectories, Spray cone angles
11	S. Moon	-	Dodecane P-xylene	XPCI	Flow width, Flow expansion angle, Shot-to-shot deviation
12	S. Lee	6-hole	n-Heptane, ethanol	Mie-scattering, PDPA	Spray pattern, Penetration, Angle
13	J. Park	6-hole	n-Heptane	-	Mass flow rate

와 균일한 혼합기 형성이 필수적으로 요구된다. 이를 위해 기존의 전체 분무의 거시적 분석과 함께 인젝터 노즐의 각 홀에서 분사되는 연료 분무의 개별 분무각 특성을 파악하고, 이해하는 것이 반드시 선행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 6개의 노즐 홀을 갖는 다공형 GDI 인젝터의 개별 분무 특성(분무패턴의 면적 및 중심 등) 및 기존에 측정할 수 없었던 개별 분무의 분무각 간접 측정 방법을 제안하고자 한다. 분무영상을 얻기 위하여 Nd:YAG 레이저와 광학렌즈의 조합을 이용해 분무패턴의 연료분포 영상을 취득 하고, 자체 개발한 매틀랩(MATLAB) 기반의 영상 후처리 코드를 이용하여 개별 분무의 특성을 분석하였다. 또한 제안된 방법을 이용하여 GDI 인젝터의 분무 특성을 측정 및 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

GDI 인젝터 개별 분무의 분무각 취득 및 분석을 위한 분무패턴 가시화를 위한 실험장치를 Fig. 1에 나타냈다. 실험장치는 연료 공급부, 제어부, 광학 측정부로 구성하였다. 연료 공급부에서는 고압의 연료를 공급하기 위해 공압 펌프(Haskel, DSF-60)를 이용하여 가압하였고, 일정한 압력 유지를 위해 어큐뮬레이터를 사용하였다.

연료는 가솔린과 물성(밀도, 점도, 표면장력 등)이 비슷하고, 단일 성분으로 구성되어 있어 결과분석에 용이한 노멀-헵테인을 사용하였다. 광학 측정부에서는 분무패턴의 촬영을 위해 Nd:YAG laser (Continuum, SL2-100)를 사용하였고, 광학렌즈의 조합을 이용하여 평면광을 형성하였다. 또한, 인젝터 팁(injector tip)으로부터 평면광까지의 거리를 제어하기 위해 전동 제어 레일을 이용하였다. 제어부에서는 인젝터의 분사 기간 및 분사 횟수를 Compact RIO(NI, cRIO-9030)를 통해 제어하였고, 신호 발생기(Berkeley Nucleonics Corp., model 575)를 이용하여 인젝터의 분사 신호와 레이저 발진 신호, 카메라 셔터신호를 동기화 하였다. 분무패턴 영상 취득을 위하여 초고속카메라(FASTCAM, Mini AX 100)를 사용하였다.

2.2 실험 방법

본 연구는 인젝터로 부터 분사되는 분무의 패턴을 이용하여 기존에 없던 개별 분무각을 간접적으로 측정하는 방법을 제시하는 것이 목적이다. 제안한 방법을 실제로 적용하기 위해 앞서 설명한 분무패턴 가시화장치를 이용하여 GDI 인젝터의 분무패턴 영상을 취득하였다. 미립화 및 분무의 발달로 인해 분무플럼이 서로 간섭이 발생하기 전 시점의 각 분무플럼의 패턴이 명확하게 나타나는 영상을 사용하였다.

다양한 조건에서 GDI 인젝터의 개별 분무각 측정을 위

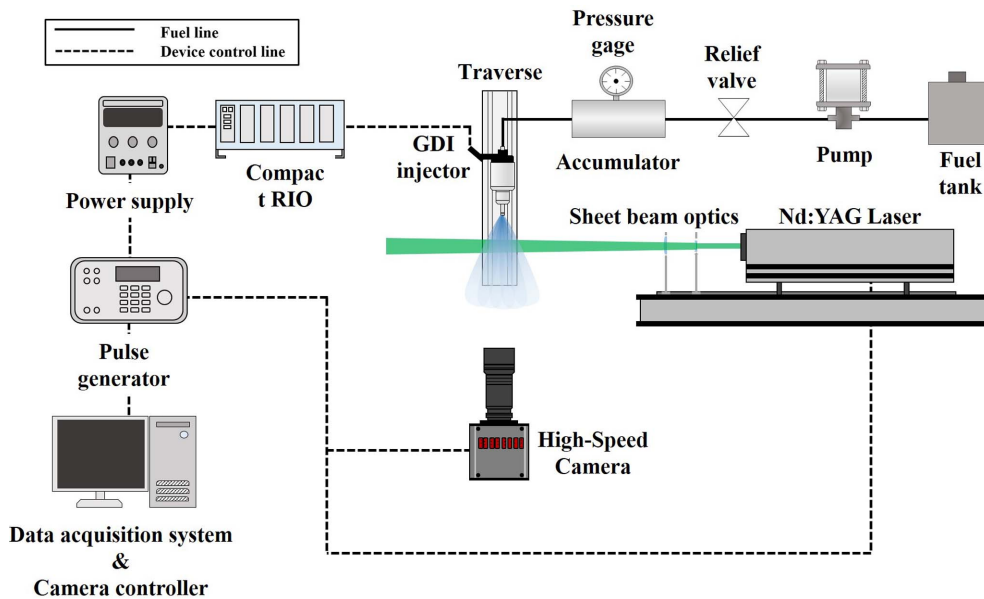


Fig. 1 Schematic diagram of spray pattern visualization system

하여 분사조건을 변경하며 실험을 진행하였다. 노즐팁과 레이저 평면까지의 거리를 10-80 mm로 5 mm씩, 분사 후 촬영까지의 시간을 0.5-1.5 ms까지 0.1 ms 증가시켜가며 촬영하였고, 얻어진 실험 결과 중 위의 조건에 적합한 40 mm와 1.1 ms를 대푯값으로 선정하였다. 40 mm는 분무가 미립화되어 형상을 잃기 전 분무 패턴이 확연히 나타나는 지점이었고, Park⁽¹³⁾의 분사율 측정 결과를 참고하여 1.5 ms의 통전기간 조건 중 통전 후 1.1 ms에서는 분사가 시작된 후 일정 시간이 지나 안정된 유량이 분사되는 시점으로 판단하였다. 실험의 조건은 Table 2에 나타났다.

이렇게 촬영된 분무패턴 영상은 MATLAB 기반 영상 후처리 프로그램을 이용하여 개별 분무각을 분석하였다. 분무패턴 영상의 후처리 과정은 Fig. 2에 나타내었다. 먼저, 취득된 분무패턴 영상을 흑백화 및 가우시안 필터를 적용하여 노이즈를 제거 한 후, 이진화의 단계로 이미지를 처리하고, 관심영역(region of interest, ROI) 기법을 사용하여 개별 분무 플럼의 예상 영역을 지정한 후 관심 영역 내의 분무가 존재하는 위치의 좌표를 얻는다. 이러한 정보를 이용하여 1) 분무패턴의 넓이를 이용하는 방법, 2) 분무경계의 좌표를 이용하는 방법, 3) 분무의 진행방향에 수직인 방향의 분무각을 얻는 방법 까지 총 세가지 방법을 이용하여 간접적으로 개별 분무각 데

Table 2 Representative experimental conditions for spray pattern visualization

Conditions	Value
Injection pressure	10 MPa
Ambient pressure	Atmospheric
Distance from nozzle tip to measuring section	40 mm
Energizing duration	1.5 ms
Shoot time after start of injection	1 ms

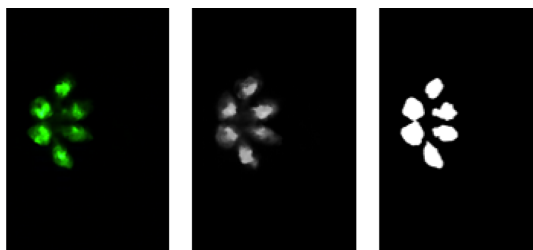


Fig. 2 Procedure of image processing (a) raw image, (b) gray-scale image, (c) binarized image

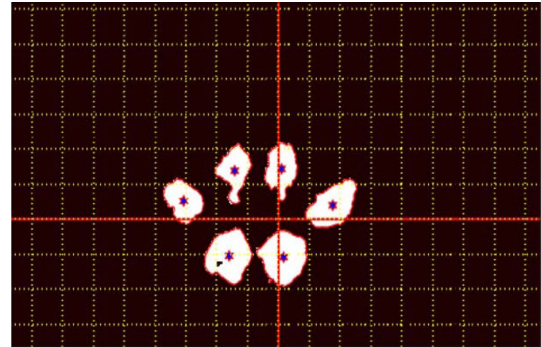


Fig. 3 Processed spray pattern image

이터를 계산한 후 비교하였다. Fig. 3은 후처리된 패턴 영상을 나타내며, 최종적으로 각 개별 분무의 중심, 분무의 경계, 분무 면적 등을 얻을 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 방법 1: 분무패턴의 면적을 이용한 방법

방법 1은 분무패턴의 면적을 이용하여 개별 분무각을 측정하는 방법이다. 연료는 인젝터 홀을 통해 원뿔 형태로 분사되는 것으로 가정한다. Fig. 4와 같이 기울어진 원뿔 형태로 분사되는 분무패턴은 평면상에 의해 타원형 영역 A(Area A)으로 가시화된다. 이를 분사 방향에 수직인 새로운 평면(New plane)에 사영하면, Fig. 5와 분무발달방향에 수직인 분무패턴 영역 B(Area B)을 생성할 수 있다. 이 새로운 평면은 타원형 영역 A의 안쪽 끝점을 포함하고, 이때 새로운 평면과 인젝터 팁의 위치와 사영된 원의 넓이를 이용해 구한 영역 B의 직경을 사용하여 식 (1)과 같이 개별 분무각(θ_1)을 구할 수 있다.

$$\theta_1 = 2 \times \arctan\left(\frac{r}{L - r \times \tan \theta}\right) \quad (1)$$

$$r = \sqrt{\frac{\text{Area}B}{\pi}}, L = \sqrt{X^2 + Z^2}, \theta = \arccos\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Z^2}}\right)$$

3.2 방법 2: 분무패턴의 경계를 이용한 방법

방법 2는 개별 분무패턴의 경계점들 중 분무각 계산에 필요한 점들을 이용하여 계산하는 방법이다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이, 인젝터 팁을 평면광까지 사영한 점(Point1)과 분무패턴의 중심을 지나가는 가상의 직선을 생성한다. 그 후 분무 경계의 모든 점들과 생성한 가상

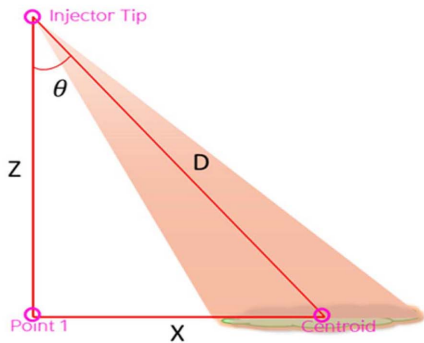
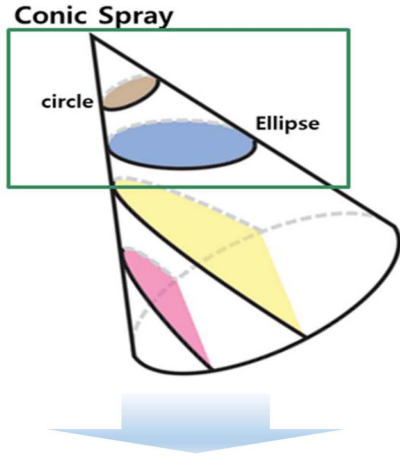


Fig. 4 Shape of spray pattern-ellipse (Method 1)

의 직선과 거리를 구하여, 가상직선과 가장 가까운 경계 두 점을 선정하여 사영한 점과 가까운 점을 끝점 1(End point 1), 먼 곳의 점을 끝점 2(End point 2)로 정의한다. 그 후 Fig. 7과 같이 인젝터 팁, 끝점 1과 2의 좌표를 이용하여 삼각형을 만들고 각 변을 L_1 , L_2 , L_3 라 한다. 이

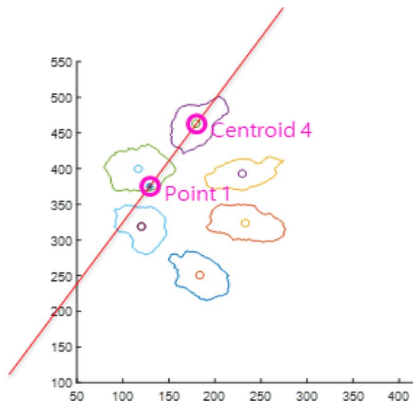


Fig. 6 Acquisition of point on the boundary of each spray (Method 2)

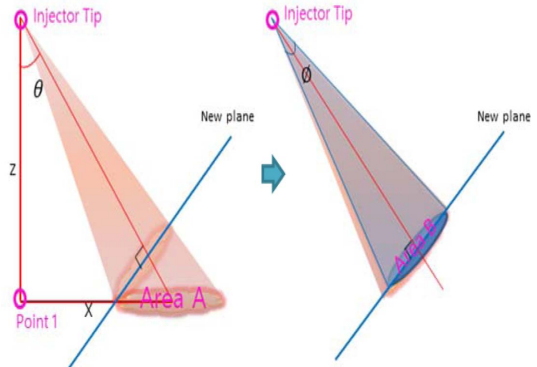


Fig. 5 Method to use the cross-section area of spray (Method 1)

를 이용하여 코사인 제 2법칙을 이용하여 분무각(\varnothing_2)를 구할 수 있으며, 수식은 다음과 같다.

$$\varnothing_2 = \arccos\left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - L_3^2}{2 \times L_1 \times L_2}\right) \quad (2)$$

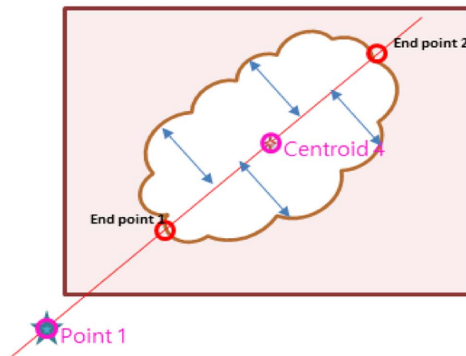
$$L_1 = |\vec{tip-End\ point1}|, L_2 = |\vec{tip-End\ point2}|$$

$$L_3 = |\vec{End\ point2-End\ point1}|$$

(※tip: injector tip)

3.3 방법 3: 수직 방향의 분무각 측정

방법 3은 방법 2와 측정과정이 전체적으로 비슷하나, 인젝터 팁과 분무의 중심을 잇는 가상직선과 만나는 분무의 경계 두 점을 이용하여 각도를 계산하는 방법 2와 달리, 가상직선과 수직방향의 가상직선을 생성하여 만나는 분무의 경계 두 점을 이용한다. Fig. 8에 나타난 것



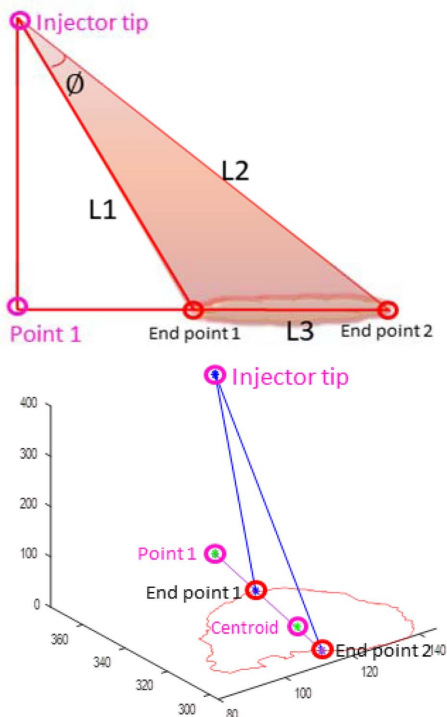


Fig. 7 Calculation of individual spray angle using extracted points (Method 2)

과 같이, 방법 2와 같은 과정으로 가상직선을 생성하고, 다시 분무의 중심을 지나는 가상직선에 수직인 직선을 생성한다. 이 수직인 직선과 만나는 분무의 경계 두 점을 끝점 1, 2로 정의한다. 이후 방법 2처럼 인젝터 팁과 끝점 1, 2의 좌표와 코사인 제 2법칙을 이용하여 개별 분무의 분무각을 구하는 것을 Fig. 9에 나타냈다.

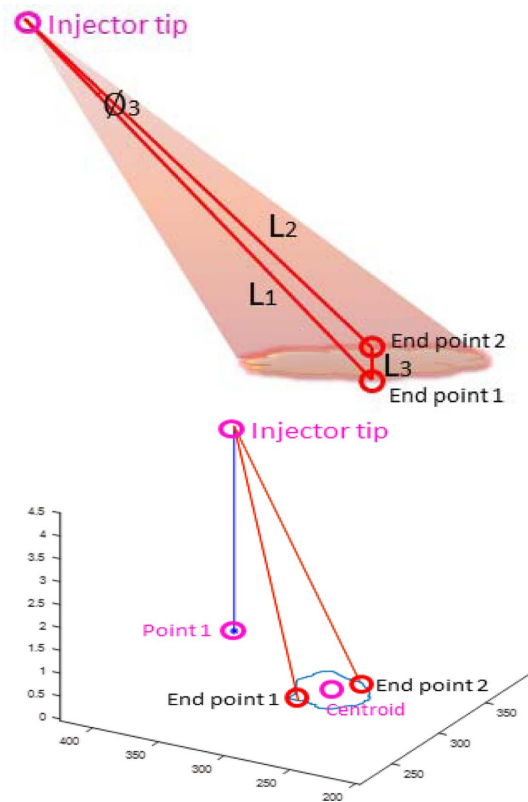


Fig. 9 Acquisition of spray angle with vertical direction (Method 3)

$$\phi_3 = \arccos\left(\frac{L_1^2 \times L_2^2 \times L_3^2}{2 \times L_1 \times L_2}\right) \quad (3)$$

3.4 개별 분무각 측정 결과

앞서 제시한 개별 분무각을 측정하는 세 가지의 방법

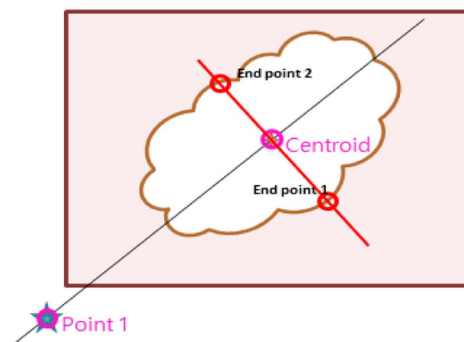
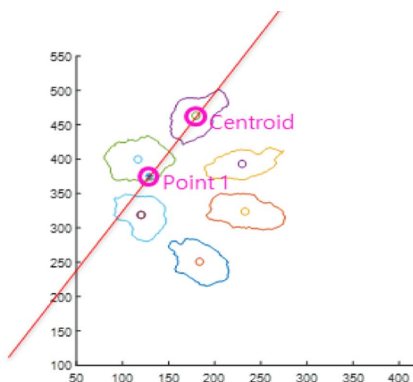


Fig. 8 Acquisition of point on the boundary of each spray (Method 3)

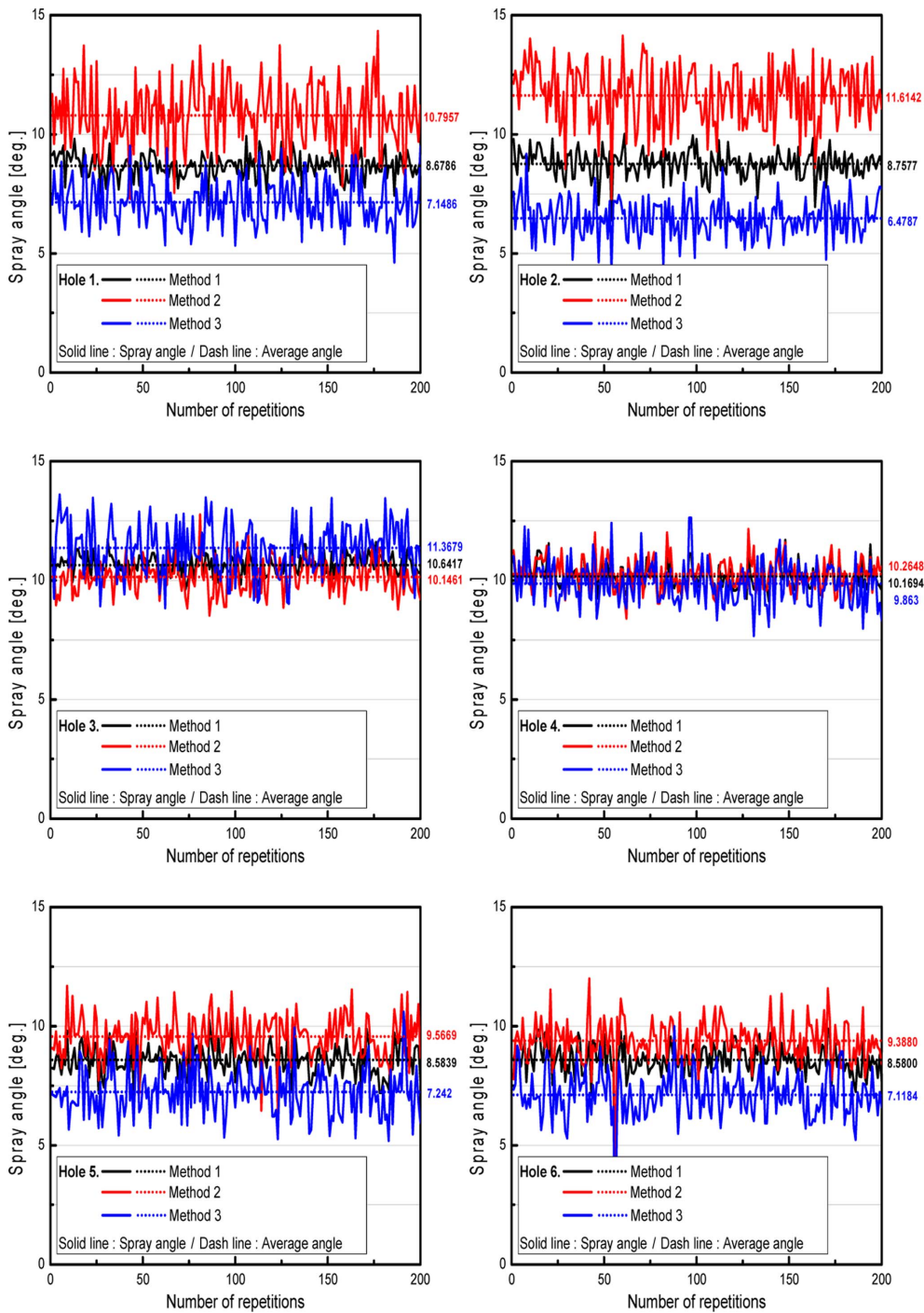


Fig. 10 Individual spray angles

을 실제 GDI 인젝터의 분무패턴에 적용하여 실험적 결과를 비교하였다. Fig. 10과 Table 3은 대표 분사조건 분

사압력 100 bar, 통전기간 1.5 ms, 촬영 타이밍 1.0 ms에서 얻어진 200장의영상을 반복 측정하여 나타낸 개별

Table 3 Results of individual spray angle

Method	Spray cone angle [°]			Standard deviation [°]		
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 1	No. 2	No. 3
Hole1	8.67	10.79	7.14	0.48	1.36	0.96
Hole2	8.75	11.63	6.47	0.56	1.25	0.81
Hole3	10.64	10.14	11.36	0.44	0.67	1.05
Hole4	10.16	10.26	9.86	0.57	0.66	0.87
Hole5	8.58	9.56	7.24	0.63	0.96	0.93
Hole6	8.58	9.38	7.11	0.77	0.94	1.02
Mean	9.23	10.29	8.20	0.58	0.97	0.94

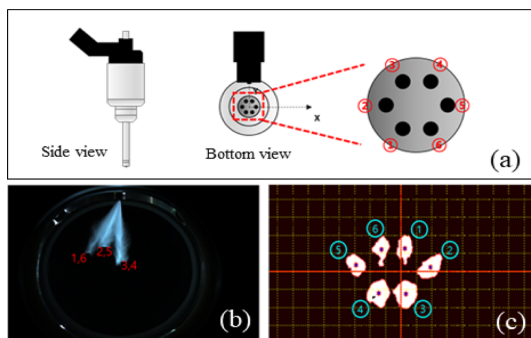


Fig. 11 Hole arrangement and spray plume number of test GDI injector.

분무각 및 편차 결과이다.

실험에 사용된 인젝터와 분무의 형태를 Fig. 11에 나타냈다. 6개의 홀을 가진 GDI 인젝터의 배열은 Fig. 11(a)와 같은 육각형 및 대칭의 형태를 가지며, 실험결과 분석의 편의를 위하여 Fig. 11(b), (c)와 같이 각 홀의 번호를 부여하였다. 실험결과에서 보는바와 같이 Hole 1, 2, 5, 6의 경우 대체적으로 가상직선을 활용하는 방법 2가 가장 크게 나타났으며 방법 1, 방법 3 순서로 크게 나타났다. Hole 3, 4는 분무패턴이 대체적으로 원형에 가깝기 때문에 세 가지 방법의 차이가 크지 않았으며, Hole 3의 경우는 나머지 홀과 순서가 반대로 나타났다. 각 측정방법으로 얻어진 분무각의 평균값을 비교하였을 때, 방법 1의 경우 최댓값이 Hole 3에서 10.64°, 방법 2는 Hole 2에서 11.63°, 방법 3은 Hole 3에서 11.36°로 나타났다. 방법 2를 적용하였을 때 최댓값으로 나타난 Hole 2는 방법 3에서는 반대로 최솟값으로 나타나 측정방향의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 방법 2와 방법 3

의 평균값들의 차이가 비교적 작은 Hole 3과 Hole 4는 측정방향의 영향이 미미하여 비교적 분무패턴이 원형에 가까울 것으로 생각된다. 또한, 방법 1을 확인해보면, Hole 3, 4가 다른 Hole에 비해 크게 나타나는데, 이는 분무패턴의 면적이 상대적으로 크게 나타나는 것으로 넓은 면적에 연료가 분사되는 것이다.

Table 3의 개별 분무각의 편차를 확인하면 각 방법의 균일도를 평가할 수 있다. 각 방법의 편차 평균은 방법 2, 3, 1의 순서로 작게 나타났으며, 본 연구에 사용된 GDI 인젝터는 방법 1이 다른 두 방법에 비해 편차가 약 39.9% 작게 나와 개별 분무각이 안정적으로 계산되는 것을 알 수 있다. Hole 1, 2, 5, 6의 경우 노즐 팁 중심축과 오리피스 중심축 사이의 설계각도가 큰 분무플럼들이다. 따라서 인젝터 팁부터 측정단면까지의 거리가 Hole 1, 2번에 비해 길기 때문에, 방법 1과 2에서 다소 편차가 크게 나타난다. 하지만 방법 1은 분무면적을 가상의 원으로 만들기 때문에 다른 방법에 비하여 비교적 편차가 안정적으로 나타난다. 또한, 다양한 홀배열 및 분사조건을 가진 여러 GDI 인젝터에 본 연구 내용을 적용하여 분무각 뿐만 아니라, 분무중심, 분무면적 등을 활용한 개별분무플럼의 균일도를 분석하는 보충연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구는 기존에 측정하지 못하던 GDI 인젝터의 개별 분무각 측정에 대한 방법을 제시했으며, 이를 이용해 개별 분무 플럼의 분무각을 측정하고 그 결과와 방법을 비교 및 분석하였다. 이 연구를 통해 내린 결론은 다음과 같다.

(1) 분무패턴 영상에서 얻은 분무가 존재하는 위치의 좌표를 이용한 개별 분무각을 측정하는 세 가지 간접적 방법을 제안하였고, 분석 프로그램을 제작하였다.

(2) 세 가지 방법 모두 개별 분무 플럼에 따른 분무각의 경향을 나타냈으며, 첫 번째 방법이 같은 분사조건에서 반복하여 측정할 때 나머지 두 방법에 비해 편차가 가장 작게 나타났다.

(3) 보다 다양한 종류의 GDI 인젝터에 적용하여 각 인젝터의 정확한 분무각을 측정하기 위한 방법을 선택하고, 각 방법의 장단점을 파악하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차 기술개발사업단과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019R1A2C1089494).

참고문헌

- (1) S. Singh, "Comparison of Fuel Economy and Gaseous Emissions of Gas-Direct Injection versus Port-Fuel Injection Light Duty Vehicles Based on Real-World Measurements", 2017.
- (2) T. Lee, K. Lee, C. Lee, J. Kim and S. Baik, "Characteristics of spray pattern on injection conditions using GDI injector", KSME 99F218, 1999, pp. 116~121.
- (3) J. H. Kim, J. H. Rhim, S. Y. No and B. S. Moon, "Comparison of spray angles of multihole port fuel gasoline injector with different measuring methods", Journal of ILASS-Korea, Vol. 5, No. 3, 2000, pp. 17~26.
- (4) M. K. Yoon, J. S. Lee and J. I. Ryu, "An Experimental study on the characteristics of Spray for 6 hole Gasoline Injector", The Korean Society of Automotive Engineers Conference, 2001, pp. 3~9.
- (5) G. Rottenkolber, J. Gindele, J. Raposo, K. Dullenkopf, W. Hentschel, S. Wittig and W. Merzkirch, "Spray analysis of a gasoline direct injector by means of two-phase PIV", Experiments in Fluids, Vol. 32, No. 6, 2002, pp. 710~721.
- (6) M. S. Chon, K. J. Jang, Y. H. Hwang and W. H. Choi, "A study on the characteristics of In-Cylinder spray flow according to the Variation of Injection Condition in a Direct Injection Gasoline Engine", KNUT Theses Collection, Vol. 40, No. 1, 2005, pp. 83~90.
- (7) N. Mitroglou, J. M. Nouri, M. Gavaises and C. Arcoumanis, "Spray characteristics of a multi-hole injector for direct-injection gasoline engines", International Journal of Engine Research, Vol. 7, No. 3, 2006, pp. 255~270.
- (8) S. Alfuso, L. Allocca, M. Greco, A. Montanaro and G. Valentino, "Time-and space characterization of multi-hole GDI Sprays for IC engines by images processing and PDA techniques", ILASS 2008, Sep. 8-10, 2008, Como Lake, Italy.
- (9) M. Mojtabi, N. Chadwick, G. Wigley and J. Helie, "The effect of flash boiling on breakup and atomisation in GDI sprays", In Proceedings of the 22nd European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS Europe, 2008, Como Lake, Italy.
- (10) B. Befrui, G. Corbinelli, M. D'Onofrio and D. Varble, "GDI multi-hole injector internal flow and spray analysis", SAE Technical Paper, (No. 2011-01-1211), 2001.
- (11) S. Moon, K. Komada, K. Sato, H. Yokohata, Y. Wada and N. 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.
- (12) S. Lee, "Effects of Injection Strategies on Spray Behavior and Atomization Characteristics for a Multi-hole GDI Injector", Thesis (doctoral) of Hanyang University Department of Mechanical Convergence Engineering, 2016.
- (13) J. Park, D. Shin and S. H. 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.