

스월형 및 팬스프레이형 고압직분식 가솔린 분사기의 상온 평판에서의 분무 충돌 특성에 관한 연구

김 종 민¹⁾ · 강 신 재²⁾ · 김 만 영^{*2)}

전북대학교 대학원¹⁾ · 전북대학교 기계항공시스템공학부²⁾

Study on the Spray Behavior from Swirl and Fan Spray Type Gasoline Injectors Impinging on the Constant Temperature Flat Plate

Chongmin Kim¹⁾ · Shin Jae Kang²⁾ · Man Young Kim^{*2)}

^{1,2)}School of Mechanical & Aerospace System Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea
(Received 19 July 2005 / Accepted 7 December 2005)

Abstract : The behavior of spray impinging on the inclined constant temperature flat plate was experimentally investigated. To clarify the wall effect of a high pressure DISI injector, a relative angle of the inclined wall to a spray axis was varied. Spray penetration along the wall was observed optically and it was compared with that of a Fan spray type and Swirl type spray. To evaluate various spray motion quantitatively, a spray path penetration which describe the development of a spray tip along the wall was newly introduced. To observe the structure of an impinging spray, it was visualized by a controlled stroboscope light and its visualized image was captured on an CCD camera. Using the digital image of impinging spray H_x and R_x was extracted to clarify the structure of impinging spray. The main parameter of the relative position of the wall was the inclined angle which was defined as the angle was varied from 0°(vertical impingement) to 60° at the same condition.

Key words : DISI(Direct Injection Spark Ignition, 직접분사식 불꽃점화), Plate impinging(평판충돌), Spray visualization(분무가시화), Swirl type injector(스월형 분사기), Fan spray type injector(팬스프레이형 분사기)

Nomenclature

L_x : distance from impinged plate, [mm]
 H_x : thickness of impinging spray, [mm]
 R_x : penetration of impinging spray, [mm]
 H_x/L_x : modified L_x (dimensionless)
 R_x/L_x : modified R_x (dimensionless)
 T_{inj} : injection duration (2.5ms), [ms]
 T_{wid} : observation time of spray region, [ms]
 T_{inj}/T_{wid} : modified time (dimensionless)

1. 서 론

지구 온난화 대응을 위한 CO₂ 규제를 주요 내용으로 하는 교토 의정서(Kyoto protocol)의 발효로 인하여 자동차 회사들은 저연비 자동차의 생산을 위하여 새로운 개념의 엔진을 개발하기 시작하였다. 직분식 불꽃점화(DISI) 엔진에 대한 개념은 이미 1930년대 롤스로이스(Rolls-Royce)사의 항공기용 Crey 엔진에 적용되었으나 기대한 성능을 도출하지 못했다. 그렇지만, 1990년대에 전자제어기술의 발달로 인하여 고압 하에서 연료분사량과 분사시기를 조절할 수 있는 기술의 개발과 적용으로 디젤엔진

*Corresponding author. E-mail: manykim@chonbuk.ac.kr

뿐만 아니라 가솔린엔진에서도 직접분사방식을 적용하기 시작하였다. 그러나 초기 직분식 가솔린 엔진의 경우 획기적인 성능과 연비 개선에도 불구하고 해결해야 할 문제점을 가지고 있었다. 즉, 직분식 엔진의 특성인 고온·고압하의 연소를 통한 연비 개선 및 HC와 CO₂의 배출 감소 대비 질소산화물(NOx) 증가문제 및 저점성의 가솔린을 고압으로 가압하는 펌프의 마모로 인한 연료 펌프의 낮은 운용 성능과 고압의 인젝터를 구동시키기 위한 고전압의 드라이버 유닛(Injection Driver Unit)로 인한 부품의 신뢰성 문제가 그것이다.

최근들어 이러한 기계·전자적인 문제점들은 점차 해결되고 있지만, 배출가스 저감을 위한 실린더 내 연소와의 밀접한 관련성 때문에 우선적으로 이와 관련된 유동 특성 파악이 선결되어야 한다. 특히 직분식 가솔린엔진의 경우 기존의 PFI(port fuel injection) 엔진과는 달리 실린더 내에서 연료가 직접 분사되기 때문에 피스톤 헤드와의 충돌 관계에 대한 연구가 이뤄져야 하지만 디젤분무에 비하여 이러한 연구가 미비한 실정이다.

Naber¹⁾는 엔진 연소실 내의 분무 충돌 효과를 실험하고 평판에서의 충돌효과를 모델링하였다. 이들은 벽면에 수직으로 고속 충돌한 액적은 벽면에 수직된 속도가 소멸하여 벽면을 따라 이동한다고 주장하였다. 하지만 충돌특성에 따른 미립화 효과를 고려하지 않음으로 인하여 분무확산이 과도하게 예측됨에 따라 Senda²⁾는 Naber¹⁾의 모델에 미립화 효과와 분무의 반사각이 특정 각도상에서 무작위한 분포를 한다고 가정하여 이를 보완하였다. 한편, Senda et al.³⁾은 위의 연구에 추가로 벽면에서의 액막형성에 관한 연구를 수행하였다. Arcoumanis et al.⁴⁾는 액적이 벽면에 충돌하면 에너지를 흡수하고 변형이 촉진되고 한계값이 초과되면서 분열이 이루어져 미립화가 되어지는 모델을 제시하였다. 한편, Naitoh⁵⁾는 OPT (Oval-Parabola Trajectory) 모델을 사용하여 평판충돌 후의 액적 크기까지 이론적으로 계산하였다. 또한, Eckhause and Reitz⁶⁾는 열전달 효과까지 고려한 벽면충돌 분무모델을 제시하였다. 하지만 위와 같은 연구들은 모두 디젤 분무에 대한 것으로서 직분식 가솔린엔진에서 중요한 분무의 충

돌특성에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 고압 가솔린분무는 디젤분무와 유사한 메커니즘을 가지고 있지만 그 유사성이 단지 기계적인 유사성과 개연성에만 의존하기 때문에 많은 실험과 고찰을 통한 정량적인 분석과 엔진을 설계하는데 필요한 기본적인 정보들이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 분무 특성이 서로 다른 팬스프레이(fan spray)형 분사기와 스윙(swirl)형 고압 가솔린 분사기를 이용하여 아직 제대로 규명되지 않은 고압직분식 가솔린엔진의 성층화 연소 및 점화를 일으키는 구형(ball-shaped) 혼합기 거동 고찰의 기초가 되는 충돌 후의 분무 길이 H_x 와 분무 반폭 R_x 과 같은 평판충돌 특성을 살펴보고자 한다. 특히 고압 가솔린 분무의 평판에 대한 충돌 특성에서 평판의 기울어짐 각도를 고려한 충돌각 변화에 의한 충돌 특성 및 그 상관관계를 고찰하고자 한다.

2. 실험방법 및 측정방법

분무의 가시화에는 레이저광을 이용하는 Mie 산란기법, 새도우그래피(shadowgraphy), LIF 기법 등과 같은 여러 가지 방법들⁷⁾이 있으나 본 연구에서는 스트로보스코프를 이용하여 발생된 산란광을 CCD 카메라를 이용하여 분무 영상을 디지털 영상으로 획득하고 저장된 영상을 영상처리 소프트웨어를 이용하여 처리하였다.

2.1 실험 방법

직접분사식 가솔린 분사기에 안정적으로 고압을 공급(㉑)시키기 위해 Fig. 1과 같이 고압 질소[N₂]탱크(㉒) 3개를 사용한 고압 연료공급장치(㉓)를 구성하였다. 간헐적인 분무를 생성하기 위하여 연료 분사 제어부는 분사기의 솔레노이드 밸브를 개폐할 수 있도록 A/D 변환기(㉔)[A/D 3100]가 장착된 PC(㉕)와 인터페이스시켜 컴퓨터로 연료 분사시기와 시간을 조절할 수 있도록 하였다. DISI 분사기(㉖)의 분무 거동 특성 및 각도와 높이를 조절할 수 있는 평판(㉗)을 설치하여 충돌특성을 관찰한다. 가시화 장치는 스트로보스코프[MSP-120, power=120W](㉘)와 컨트롤 패널[MSC-1](㉙)시스템으로 구성되어 발

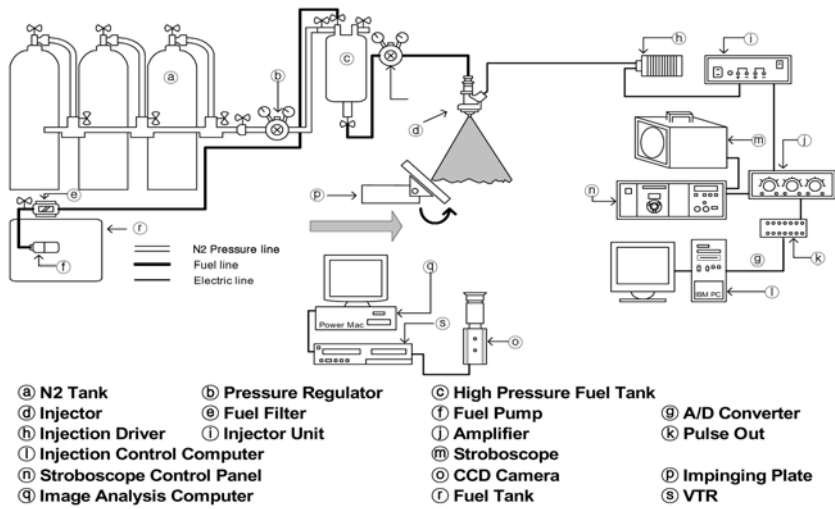


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

광주기를 연료분사기의 분사주기와 동조시켜 콘트롤 컴퓨터(①)로 조절할 수 있게 한다. 분사 개시 이후부터 발달되는 분무형상을 시간 분해하여 얻어진 정지 분무 영상을 CCD 카메라[Toshiba,IK536](②)를 이용하여 이미지프로세싱(④)컴퓨터로 받아 동시에 VTR(⑤)에 기록하고 영상처리 소프트웨어를 사용하여 분무거동을 분석하였다. 획득된 영상의 처리는 분사영상에서 배경영상을 제거한 8bit 영상의 명도를 0~255등급으로 히스토그램화하여 히스토그램 기술기의 절대값이 0이 되는 지점을 임계명으로 정의하고 분무경계로 규정⁷⁾하였다. 규정된 임계명도는 획득된 영상에 따라 약 70~80근처의 값이 된다. 한편, 이러한 광을 이용한 실험에서 유의할 사항은 광원의 선택으로서, 균일한 광을 유지할 수 있는 광원의 선택이 좋은 영상 이미지를 획득하는데 있어 매우 유리하다.

2.2 측정 방법

Fig. 2에서와 같이 평판에 충돌하는 분무의 형상에서 분사기와 충돌평판과의 거리를 50mm지점에서의 충돌분무높이(H_x)와 충돌분무 도달거리(R_x)라고 정의하고, 정의된 H_x 및 R_x 에 대하여 분석하였다. 충돌각은 분무의 수직방향에 대한 충돌평판에 대한 각도(Angle)라 정의하고 5가지 경우($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$)로 변화시켰다. 분사기와 충돌평판의 거

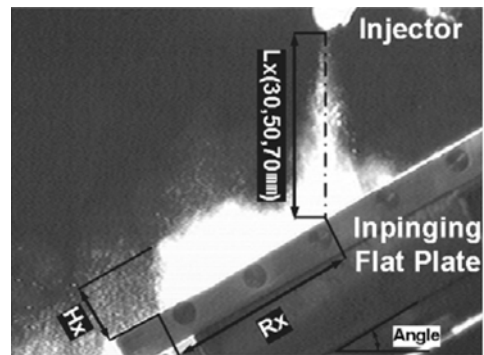


Fig. 2 Impinging spray structure and major parameter

리는 30mm, 50mm, 70mm로서 본 논문에서는 L_x 가 50mm인 지점을 주안점으로 하여 분석하였다. 그 이유는 30mm의 실험결과 분사압에 상관없이 분열(breakup)이 이뤄지지 않아 액주상태로 분사·충돌되었고, 또한 70mm에서는 액적들의 미립화가 준정상 상태에 도달하여 충돌에 의한 효과를 관찰할 수 없었기 때문이다. 연료 분사압은 5 MPa과 9 MPa의 두 경우로 하였고 시험연료로서는 가솔린기관의 실린더 내 실험에 일반적으로 쓰이는 노말헵탄(C_7H_{16})을 사용하여 대기압의 분위기 압력 상태에서 연료막(fuel film)을 제거하지 않고 분사실험을 하였다.

본 연구에 사용된 분사기는 두 가지이다. 하나는 기존의 미쯔비시사에서 상용화하여 엔진에 적용한

스월형 분사기이고 다른 하나는 도요다와의 공동연구를 통하여 덴소에서 개발한 분사기로서, 높은 스월을 요구하지 않으면서도 성층화 연소영역을 유지하며, 다양한 엔진에 보다 쉽게 장착할 수 있는 높은 장착성능을 고려한 팬 스프레이형 분사기^{8,9)}이다. Fig. 3(a)와 (b)는 각 분사기의 외형적 특징과 내부 단면의 형상을 보여 주고 있다. 그림에서와 같이 스월형 분사기는 편향각(off-set angle)이 없으며, 오리피스 직경은 0.85mm이다. 한편 팬 스프레이형 분사기는 덴소가 도요다의 신형 엔진 New Concept D-4 엔진⁹⁾에 적용하기 위해 개발한 DISI용 고압 슬릿(slit)노즐 분사기이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 노즐 팁에는 크기 0.85mm×95 μ m과 편향각(off-set angle) 18°의 슬릿이 적용되어 있다.

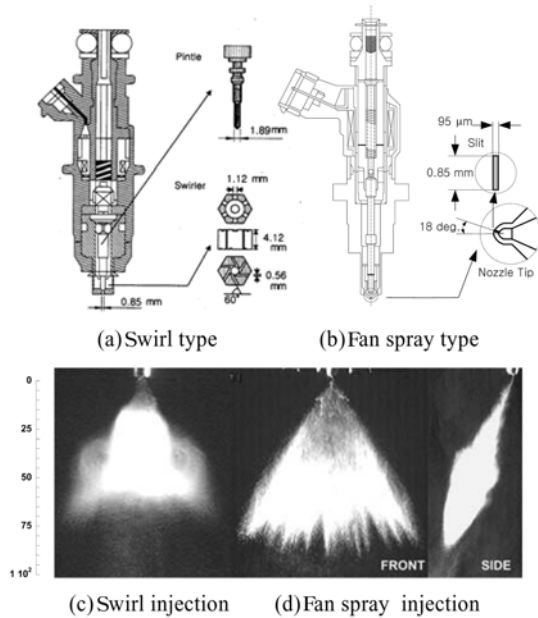


Fig. 3 Schematic and injection image of the DISI injectors

Fig. 3(c)와 (d)는 분사기의 분사이미지로서 고압 DISI형 분사기의 분무 형상을 보여준다. 특히 팬 스프레이 형의 분사이미지인 Fig. 3(d)는 분사기 끝단에 적용된 슬릿의 편향각에 의해 분사되기 때문에 분사모습이 Fig. 3(c)의 스월형 분사 이미지처럼 대칭(symmetry)적인 분무영역이 아니고 앞면 및 측면의 이미지 형상이 서로 다를 수 있다.

2.3 예비 실험

Fig. 4는 스월형 및 팬스프레이형 분사기의 분사압력의 변화에 따른 분사량을 나타낸 것이다. 분사압 9 MPa에서 팬스프레이형 분사기의 분사량은 스월형 분사기의 약 50%이다. 한편, 1 MPa에서 팬스프레이형 분사기의 경우 스월형 분사기 분사량의 50% 미만임을 알 수 있다. 이는 팬 스프레이형 분사기는 상대적으로 고압에서의 운용을 하도록 설계되어 있기 때문에 밸브를 열기 위하여 스월형 분사기보다 커다란 힘(분사압력)을 필요로 하기 때문이다.

한편, Fig. 5는 분사압이 5 MPa 및 9 MPa일 때 각 분사기의 밸브개폐시간을 증가시켰을 때의 분사량을 나타낸 것으로서, 전형적인 경향을 나타내고 있다. 또한, 스월형 분사기의 경우 9 MPa의 기울기가 5 MPa에 비해 약 18% 정도 크고 팬스프레이형 분사기의 경우는 27% 정도 크음을 알 수 있다.

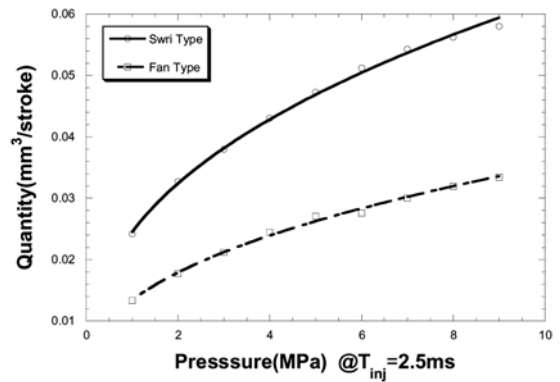


Fig. 4 Comparison of the injection quantity for injection pressure(at $T_{inj} = 2.5ms$)

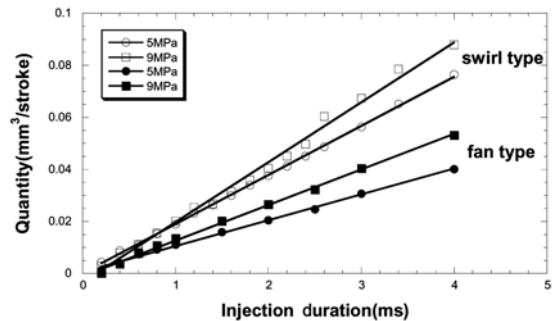


Fig. 5 Comparison of the injection quantity for injection duration

3. 결과 및 고찰

일반적으로 분무의 초기영역(initial part)은 분사기 출구 가까이에 있는 혼합영역으로서 분무각을 정의할 수 있는 분명한 형태를 지니고 있을 뿐만 아니라 미립화가 이뤄지는 부분으로서 액주와 액적이 서로 공존하는 부분이다. 한편, 혼합영역(mixing part)은 초기영역의 하류에 있는 영역으로서 강한 난류혼합이 일어나는데, 이러한 초기영역과 혼합영역을 관통영역(penetration part)이라고 하며, 이 영역에서는 분무의 관통속도가 일정한 정상분무의 특성을 나타낸다. 최종적으로 정체영역(stagnation part)은 분무전단의 영역으로서 분무의 관통속도가 급격하게 감소하는 비정상 특성을 나타내는 영역이다. 본 연구에서는 이러한 분무 특성을 살펴보기 위하여 팬 스프레이형과 스월형 분사기의 분무 충돌 후의 분무 높이 H_x 와 충돌후의 반경방향 거리 R_x 를 이용하여 충돌각의 변화에 따른 각 분사기의 분무 및 충돌 특성을 고찰하였다. 충돌평판과 수직거리 L_x 는 50mm로 고정하였고 충돌 평판의 각을 0°, 15°, 30°, 45°, 그리고 60°로 변화시켰다.

아래에서는 각 조건에서 가시화 장치로 습득한 이미지로부터 도출된 충돌분무의 H_x 와 R_x 에 기초한 H_x/L_x 와 R_x/L_x 를 고찰하였다. 한편, 분사시작 이후와 분사가 종료된 점 이후의 충돌분류의 발달 과정을 관찰한 결과 충돌분류의 기울기가 분사가 종료되는 지점에서 급격하게 변함이 관찰되어 이 부분을 중점적으로 고찰하였다. 즉, 충돌분류의 생성을 분사중일 때와 분사이후의 관계로 구분하기 위하여 인젝터의 분무장 관찰시간 T_{wid} 과 인젝터의 분사기간 T_{inj} (2.5ms)을 이용하여 무차원화 시켰다. 위와 같은 조작으로 얻어진 수정된 데이터를 이용하여 log-log 그래프로 도시하였을 때 X-축의 T_{inj}/T_{wid} 값이 1 보다 작을 때는 분사중일 구간이고 1 이상일 때는 분사가 종료된 이후의 시간(7ms까지)을 의미한다. 이러한 조작의 목적은 분사기가 분사중일 때와 분사 이후의 H_x 와 R_x 의 거동의 파악을 살펴보기 위함이다.

3.1 충돌각의 변화에 의한 HX

Fig. 6은 분사압이 각각 5 MPa 및 9 MPa일 때 팬 스프레이형 분사기의 H_x/L_x 를 나타낸 것으로서, 분사압에 관계없이 T_{inj}/T_{wid} 가 증가함에 따라 H_x/L_x 도 같이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 충돌각의 변화에 관계없이 충돌효과가 지속적으로 유지되고 있음을 의미하는 것으로서, 분사가 종료된 이후에도 일정 기간 동안 분무에 관성력이 존재하기 때문이다. 또한, 충돌각이 증가함에 따라 H_x/L_x 는 점차 증가함을 보여 주는데, 이는 충돌각이 커질수록 분무의 액적들이 충돌평판에 충돌되어 발생하는 미립화 에너지가 감소되어 분무의 관성력이 감소되기 때문이다.

Fig. 7은 스월형 분사기의 H_x/L_x 를 나타낸 것으로서, 충돌각이 증가함에 따라 동일 분사압 및 충돌각에서 팬 스프레이형 분사기의 경우보다 H_x/L_x 가 커짐을 보여주고 있다. 한편, 분사압 5 MPa일 때 충돌각이 낮은 경우 T_{inj}/T_{wid} 가 증가함에 따라 H_x/L_x 는 오히려 감소하고 있는데, 이는 앞서 Fig. 3의 (c) swirl injection 이미지상에서 관찰된 스월형 분사기의 분무형상 및 구조가 팬 스프레이형 분무와 달리 분무내부에 순환영역(swirl)이 존재하여 스월형 분사기의 분무장과 평판의 충돌 시 충돌각 변화가 분

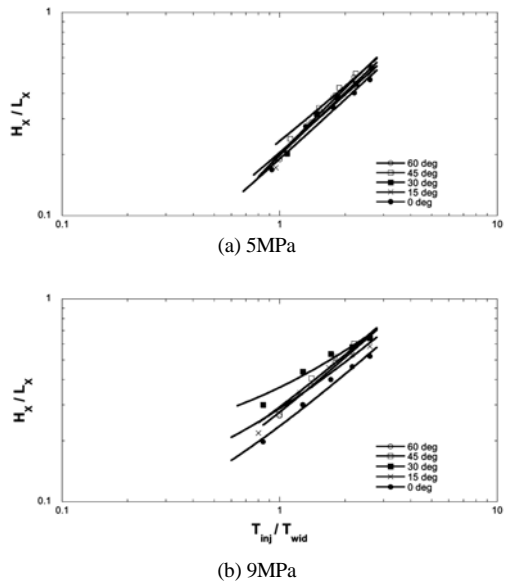
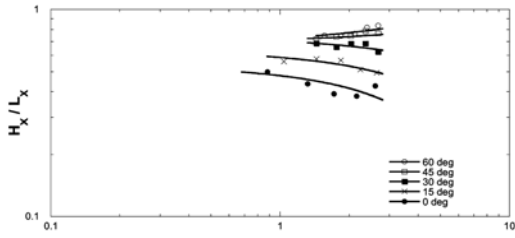
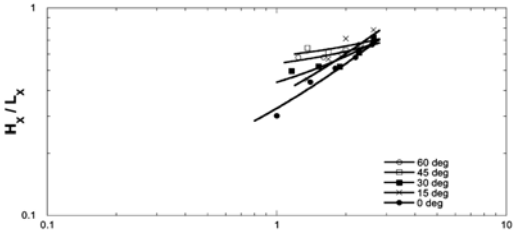


Fig. 6 Comparison of Hx from the fan spray type injector



(a) 5MPa



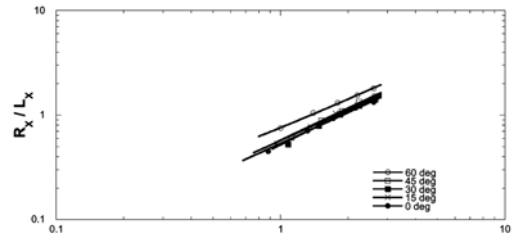
(b) 9MPa

Fig. 7 Comparison of H_x from the swirl type injector

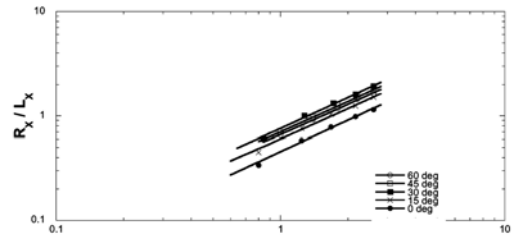
무구조에 미치는 영향이 팬스프레이형 분사기보다 크지 않기 때문이다. 즉, 스윙형 분사기의 충돌분무는 스윙형 분무의 구조적인 특징으로 인하여 충돌평판에 의한 효과가 상쇄되는 특징을 보인다. 또한 팬 스프레이형 분무의 속도분포는 주로 분사방향의 1차원적으로 형성되는 경향을 보이지만 스윙형 분사기는 재순환 영역을 일으키는 스윙이 분무 내부에 존재하므로 분무장 내에 3차원속도장이 형성된다. 따라서 평판 충돌 후 감소된 에너지의 액적은 충돌하지 않은 분무장의 영향을 받아 팬 스프레이형과 같은 충돌 후 거동을 보여주기 힘들다. 이는 스윙형 분무장의 분무 축방향 속도가 팬 스프레이분무보다 낮기 때문에 충돌효과에 의한 변화가 작은 것으로 사료된다.

3.2 충돌각의 변화에 의한 R_x

Fig. 8과 9는 팬 스프레이형 및 스윙형 분사기의 T_{inj}/T_{wid} 에 따른 R_x/L_x 를 도시한 것으로서, 충돌분무의 반경 R_x/L_x 는 분사기의 종류 및 충돌각의 변화에 관계없이 거의 유사한 경향을 보여주고 있다. 즉, 충돌분무의 반경은 분사기의 구조에 영향을 받지 않음을 의미한다.

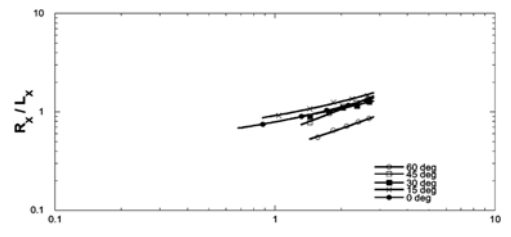


(a) 5MPa

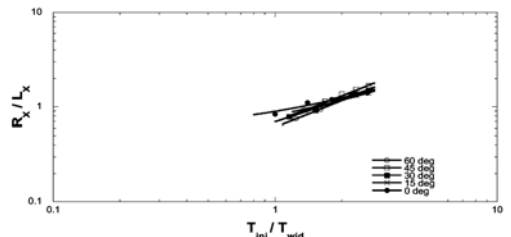


(b) 9MPa

Fig. 8 Comparison of R_x from the fan spray type injector



(a) 5MPa



(b) 9MPa

Fig. 9 Comparison of R_x from the swirl type injector

4. 결론

본 연구에서는 직분식 가솔린 분사기들의 고압 분무 충돌 특성을 살펴보기 위하여 충돌각의 변화에 따른 팬스프레이형 및 스윙형 분사기의 평판 충돌 후 거동 특성을 고찰하였다. 예비실험을 통하여 충돌거리(L_x)를 설정하였고 분사압의 변화에 따른

각 분사기의 분사량을 측정하였다.

팬스프레이형 및 스월형 분무의 충돌각에 의한 효과 H_x, R_x 는 팬스프레이형 분무가 스월형 분무에 비하여 더 크게 나타남이 관찰되었다. 따라서 실린더 내에 분사된 혼합기가 구형혼합기(ball-shaped)를 형성하여 점화플러그로 이동하여 안정된 성층화연소를 하기 위해서는 실린더 내에 분사된 혼합기의 안정된 제어가 필요하다. 이를 위하여 팬스프레이형 분사기는 충돌 이후의 분무장 강건도가 스월형보다 강하므로 충돌각을 조절함으로써 분사기에서 실린더 내부로 분사된 혼합기의 거동을 비교적 쉽게 제어할 수 있다. 하지만, 스월형 분사기는 팬스프레이형 분사기에 비해 상대적으로 충돌 이후의 거동이 충돌각에 의하여 받는 영향이 크지 않기 때문에 분무 후의 유동제어를 위해서는 와류나 텀블과 같은 공기역학적 효과를 필요로 한다.

본 연구에서는 상온 평판에서의 분무 충돌특성만을 고려하였으나 향후 충돌 후 잔류하는 벽유동(wall flow)에 의한 액적의 흡착효과를 고려하고 이러한 벽유동 제거에 관한 연구와 동시에 분위기압을 실린더 내 압력으로 올릴 수 있는 실험방법에 관한 연구를 수행할 것이다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project (무저공해자동차 사업단) 및 전북대학교 자동차신기술연구센터의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) J. D. Naber and R.D. Reitz, "Modeling Engine Spray/Wall Impingement," SAE 880107, 1988.
- 2) J. Senda, M. Kobayashi, S. Iwashita and Fujimoto, "Modelling of Diesel Spray Impingement on a Flat Wall," SAE 941894, 1994.
- 3) J. Senda, T. Kanda, M. Al-Roub, P. V. Farrell, T. Fukami and H. Fujimoto, "Modelling Spray Impingement Considering Fuel Film Formation on the Wall," SAE 970047, 1997.
- 4) C. Arcoumanis, M. Gavaises and B. French, "Effect of the Injection Processes on the Structure of Diesel Spray," SAE 970799, 1997.
- 5) K. Naitoh, Y. Takagi, H. Kokita and K. Kuwahara, "Numerical Prediction of Fuel Secondary Atomization Behavior in SI Engine Based on Oval-Parabola Trajectories (OPT) Model," SAE 940526, 1994.
- 6) J. E. Eckhause and R. D. Reitz, "Modelling Heat Transfer to Impinging to Impinging Fuel Sprays in DI Engines," Atomization and Sprays Vol.5, pp.213-242, 1995.
- 7) J. S. Kang, W. Choi and C. S. Bae, "Analysis of Transient Diesel Spray with Visualization and Injection Rate Measurement," Transactions of KSAE, Vol.12, No.5, pp.12-18, 2004.
- 8) M. Kaneda, T. Baika, S. Kato, M. Iwamuro, M. Koike and A. Saito, "Application of a New Combustion Concept to Direction Injection Gasoline Engine," SAE 2001-01-0531, 2001.
- 9) K. Takada, T. Sugimoto, T. Tsuchiya, M. Ogawa, S. Ueda and K. Yoneshige, "Slit Nozzle Injector for a New Concept of Direct Injection SI Gasoline Engine," SAE 2000-01-1902, 2000.
- 10) T. Ebra, K. Amagai and M. Arai, "Movement and Structure of the Diesel Impinging on an Inclined Wall," SAE 970542, 1997.