

〈논 문〉 SAE NO. 97370098

## 가솔린 직분식 인젝터의 분무 및 연소특성에 관한 연구

### A Study on the Spray and Combustion Characteristics of Gasoline Direct Injector

신 민 규\*, 박 중 호\*\*, 유 철 호\*, 이 내 현\*, 최 규 훈\*\*  
M. K. Shin, J. H. Park, C. H. Yu, N. H. Lee, K. H. Choi

#### ABSTRACT

Nowadays, gasoline direct injection engines are being commercialized by virtue of improvement in control technology of spray, flow, air fuel ratio. The stratified charge type has the advantage of improving lean limit. The homogeneous type has the advantage of reducing engine-out hydrocarbon emissions in the first 30 seconds after a cold start, in addition, improving transient air fuel ratio control.

The vaporization and mixing of injected fuel with air has to be completed in a short time and the fuel film in cylinder and on piston has to be minimized. So, the flow and injection should be well controlled. This paper surveyed the spray characteristics of gasoline direct injection by using laser equipment and the combustion characteristics of the single cylinder engine using homogeneous mixture type gasoline direct injection.

주요기술용어 : Gasoline Direct Injection(가솔린 직분사), Homogeneous Mixture(균일혼합기), Stratified Charge(층상급기), Cold Start(냉시동), Transient Operation(과도운전), Spray(분무)

#### 1. 서 론

날로 심화되고 있는 지구 환경 문제로 유해 배출 가스가 적고, 연비가 좋은 자동차에 대한 요구가 점점되고 있다. 다양한 저연비 기술중에서 비교적 적은 코스트로 큰 연비효과를 거둘 수 있

는 것으로 평가되고 있는 화박연소 엔진 탑재 차량이 일본의 자동차 메이커를 중심으로 시판되고 있고, 최근에는 보다 더 적극적인 연비 저감 또는 냉시동시 배기가스 대책 기술로써 가솔린 연료를 실린더 내에 직접분사하는 엔진 탑재 차량이 부분적으로 상용화되기에 이르렀다.<sup>1),2)</sup>

직접 분사식 가솔린 엔진은 분사된 연료의 벽류를 억제하고, 짧은기간 내에 공기와의 혼합과

\*기아자동차

\*\*정회원, 기아자동차

기화가 적절하게 이루어지도록 하기 위한 유동 및 분무 제어의 최적화가 무엇보다도 중요하다.<sup>3)</sup> <sup>4),5)</sup> 따라서 본 논문에서는 가솔린 직접분사 엔진의 최적 인젝터 및 위치 선정, 분사압력 및 분사시기의 설정 등을 위한 기초자료를 얻기 위해 레이저 장비를 이용하여 직접 분사용 고압인젝터의 연료분무 가시화, 분무 속도 및 입경 측정 등 분무특성 실험을 수행하였다. 또한 연비향상 측면에서는 총상혼합기를 이용하여 초회박운전이 가능한 후기분사방식 보다는 불리하지만 냉시동 시나 과도운전시의 배기가스 저감에 효과적인 이온공연비(균일혼합기)를 이용하는 조기분사방식을 대상으로<sup>6),7)</sup> 엔진실험을 수행하여 직접분사 인젝터의 분사압력 및 분무각도에 따른 연소성능 및 배기가스 배출특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 분무 측정 및 고압연료 분사장치

레이저를 이용한 연료분무 특성 실험을 위하여 Fig.1과 같은 실험장치를 구성하였다.

2.1.1 분무 가시화장치

분무 가시화를 위한 광원은 Nd-YAG 레이저(최대출력 200mJ)를 사용하였으며, 레이저 출력부에서 나오는 원형빔은 다관절팔 형태의 광전달기구를 경유하여 이송장치에 설치된 초점거리 50mm의 원통렌즈(Cylindrical Lens), 초점거리 1000mm의 구형렌즈(Spherical Lens)로 분무가

시화 측정부에 길이 120mm, 두께 0.2mm의 평면빔을 형성한 후 Beam Stopper에 도달하도록 하였다. 광원의 지속시간은 10ns로 매우 짧고, 암실조건에서 연료의 가시화에 충분한 이미지 강도(Image Intensity)를 유지하도록 광원의 출력을 50mJ로 하였다. 연료분무에 의해 산란된 이미지는 CCD카메라(MEGAPLUS 4.2)에서 촬영되어 디지털로 변환된 후, Frame Grabber와 모니터로 전송된다.

2.1.2 입경 및 속도 측정장치

분무연료의 입경과 속도를 측정하기 위한 PD-PA(Phase Doppler Particle Analyzer)는 레이저, 광학계, 신호 처리계와 컴퓨터로 구성되어 있다. 아르곤 이온 레이저(최대출력 5W)에서 발생된 레이저빔은 화이버 드라이브(Fiber Drive)에서 2차원의 기준빔(Unshifted Beam)과 40Mhz 주파수 천이된 빔(Shifted Beam)으로 나누어진다. 이러한 레이저 빔들은 광화이버(Optical Fiber)를 통하여 트랜스미터(Transmitter)에 공급되어 측정체적(Probe Volume)을 형성한다. 측정체적을 통과하는 연료입자에 의한 산란광은 리시버(Receiver)를 통하여 광전관(Photo-Multiplier)에 도달하여 전기적인 신호로 변환된 후에 신호처리계에 의하여 처리된 후 데이터를 소프트웨어에 의하여 실시간으로 화면에 나타내었다. 렌즈의 초점거리는 트랜스미터의 경우 500mm, 리시버의 경우 300mm를 이용하였고, 트랜스미터와 리시버는 3차원 이송장치에 의해 측정위치를 이동할 수 있다.

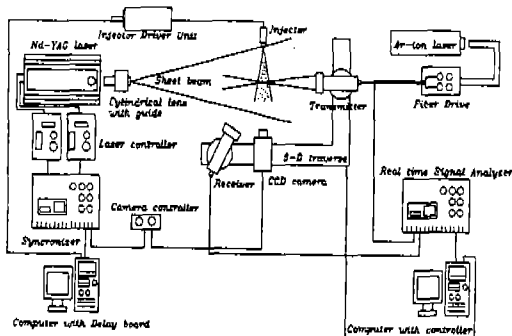


Fig.1 Schematic Diagram of Test Equipment

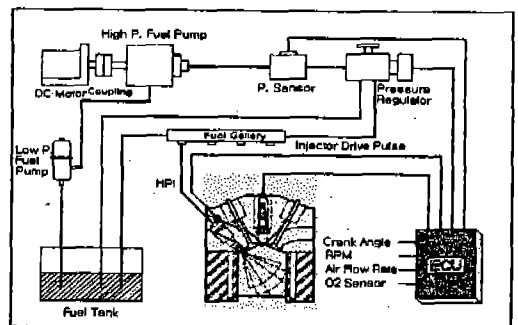


Fig.2 High Pressure Gasoline Injection System

### 2.1.3 고압연료 분사시스템

가솔린을 실린더내에 직접분사하기 위한 고압 연료 분사시스템을 Fig.2와 같이 구성하였다.

연료탱크로부터 저압용 연료펌프에 의해 공급된 연료는 고압연료펌프에 의해 가압된 후 압력 조절기를 통해 솔레노이드 밸브의 Duty Ratio로 분사압력이 조절되고, 설정된 압력으로 인젝터에 공급되었다. 고압조절기로부터 바이패스된 연료는 저압조절기를 거쳐 연료탱크로 전달된다. 실험에 사용된 연료는 노말헵탄(Refraction Index : 1.38777, 밀도 : 680kg/m<sup>3</sup>)이고, 인젝터는 스웰 발생 나선홈을 가진 스웰 인젝터로 분무각 20°, 40°, 60°를 대상으로 실험을 수행하였다.

## 2.2 실험조건 및 측정방법

분무가시화는 대기중으로 분사하는 대기분사와 흡입과정중 실린더내로 직접 분사하는 흡기분사 조건에서 각각 수행하였다.

대기분사의 경우에는 분무 중심부의 수직 종단면과 인젝터 선단을 기점으로 분무축 방향으로 Z=30mm에서 수평한 횡단면을 가시화 대상으로 하였다. 연료의 분사압력은 20, 35, 50, 70bar로 하였고, 평면법의 강도를 작게하고 반사광에 의한 왜곡을 방지하기 위하여 분사기간은 10ms로 하였다. 또한, 분무의 진행과정을 측정하기 위하여 분무시작후 1ms와 2~14ms 동안 2ms 간격으로 촬영하였다.

흡기분사의 경우에는 정상류장치를 이용하여 흡기부압의 조정과 함께 흡기밸브 Lift 변화에 따른 흡입과정중의 분무패턴의 변화를 가시화하였는데, 실험조건으로는 분사압력을 50bar, 분무각도를 45, 60°, 분사기간을 1ms로 하여 수평한 횡단면을 가시화 하였다.

PDPA는 두빔의 레이저 도플러 속도계(Dual Beam Laser Doppler Velocimeter)에 입자의 직경을 측정하기 위해서 리시버 광학부에 3개의 검출기(Detector)를 추가한 장치이며, 상대적으로 구형의 투명한 입자의 크기 측정에 가장 적합하다. 광전관 전압, 주파수 천이, 광학적인 사양이 적합하다면 PDPA에 의하여 측정된 SMD(Sauter Mean Diameter)와 같은 통계적인 양은

분무의 특성을 가장 잘 나타내므로 과대한 광전관 전압에 의한 광학적인 노이즈 발생을 억제하도록 광전관 인가전압은 광학적인 노이즈가 발생을 시작하는 전압을 한계치로 설정하였고, 부적절한 입자경 측정범위 설정에 의해 큰 입경이 계속에서 제외되는 것을 방지하기 위하여 큰 입경을 중시한 입자경 측정범위를 설정하였다.<sup>8)</sup>

입경과 속도는 인젝터 선단을 원점으로 하여 분무축 방향(Z)으로 Z=10, 30, 60mm를, 반경 방향(R)으로는 분무가 도달되는 위치까지 이동하며 동시에 측정하였다. 연료의 분사압력은 20, 35, 50, 70bar로 하였고, 분사주파수 및 분사기간은 실엔진의 1500rpm, 1.5bar BMEP에 대응하는 12.5Hz, 1ms로 하였다. 각각의 측정위치에서 1000~3000개의 데이터를 획득하여 측정된 값들의 축방향, 반경방향의 평균 속도 및 SMD를 구하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 분무 가시화

Fig.3은 분사압력 50bar로 10ms 동안 분사시 분사시작후 2ms에서의 분무각도 변화에 따른 가시화 결과이다. 분무 수직 종단면 가시화 결과를 보면 분사각도가 가장 작은 20°의 경우 분무 도달 거리가 가장 길며 이로 인하여 피스톤과의 충돌에 따른 벽류 생성 가능성이 가장 큼을 알 수 있다. 또한 분사각도가 클수록 공기유입이 쉬워

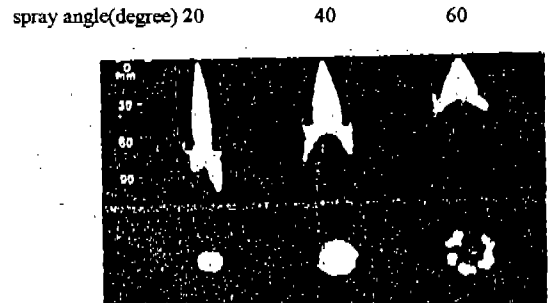


Fig.3 Visualization Photograph of Spray Pattern at Various Spray Angles

저 분무선단부의 진행거리는 작아지나 분무각은 커지며 하류에 와류(Vortex)가 형성됨을 알 수 있다. Z=30mm에서 분무의 단면사진을 보면 분사각도가 작은 20°에서 분무단면에 공기유입이 이루어지지 않아 미립화가 되는 것이 보이지 않지만 40°에서는 공기유입에 의한 미립화가 분무의 바깥면에서 시작됨을 볼 수 있다. 반면에 분사각도 60°인 경우 충분한 공기유입으로 원추(Hollow Cone) 형상으로 완전히 발달된 것을 알 수 있다. 그리고 분무면이 6개로 나누어져 공기유입을 촉진하도록 되었는데, 이것은 본 스월형 인젝터 내부의 6개의 스월발생 나선돌기에 기인하는 것으로 판단된다.

분무각도 60°에서 분사압력 변화에 따른 분무형상을 Fig.4에 나타내었다. 이경우 가시화 조건은 10ms 분사시 분사시작후 2ms에서의 가시화 결과이다. 분사압력이 클수록 분사율이 증가되어 연료입자의 밀도가 증가되는 것을 볼 수 있으며,

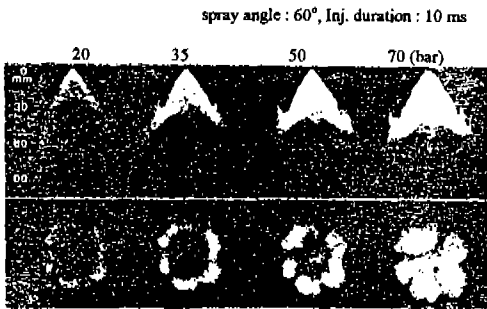


Fig.4 Visualization Photograph of Spray Pattern at Various Injection Pressures

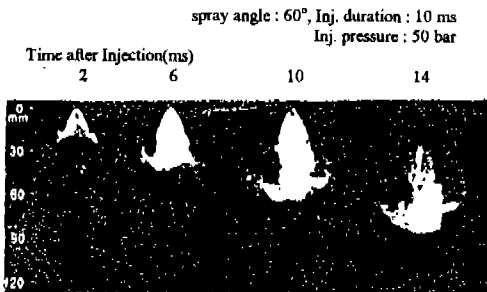


Fig.5 Visualization Photograph of Injection Time History

분무형상의 변화없이 분무선단의 진행거리가 길어져 공기 접촉면이 증가된다. 따라서 특정 부하 조건에서 적절한 연료량을 고압으로 분사시키는 경우 미립화 촉진과 함께 분사시간의 감소에 의한 공기와 혼합되는 기회 시간이 보다 증대되어 균일 혼합기 형성에 유리함을 알 수 있다.

분무각도 60°, 분사압력 50bar 조건에서 시간 변화에 따른 분무의 진행과정을 Fig.5에 보여주고 있다. 분사 종료 후에는 분무의 후단도 공기와 접촉하여 미립화가 진행되고 선단부는 진행속도가 느려졌지만 여전히 연료입자가 밀집된 것을 볼 수 있으며 와류는 계속 성장하여 분무의 미립화 및 공기와의 혼합을 증진시킨다.

Fig.6은 분사각도에 따른 분무 도달 거리(Penetration)를 시간에 따라 보여주고 있다. 분사개

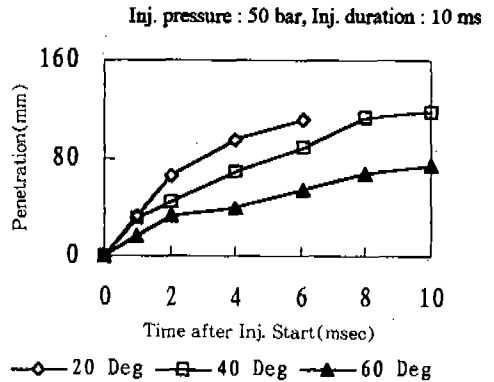


Fig.6 Spray Penetration as a Function of Time After Injection at Various Spray Angles

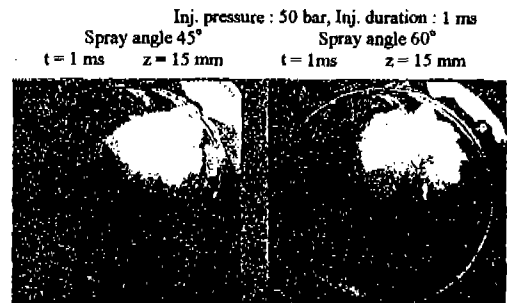


Fig.7 Visualization Photograph of Spray Cross Section in Cylinder for 45°, 60° Spray Angles

시 후 분무주류의 도달 거리는 급격히 진행되어 분사후 2ms에서 분사각도에 따라 약 15~35m/s의 속도로 30~70mm 진행됨을 알 수 있으며 이후 분무가 분열됨에 따라 분무 도달 거리의 정도는 감소됨을 알 수 있다.

흡기밸브가 열리는 초기에 밸브를 통한 흡입유동이 존재하는 시기에 연료를 분사하는 조기분사 방식의 경우, 흡입 유동이 분사된 연료입자에 미치는 영향을 파악하고자 투명한 석영 실린더를 사용한 정상류 장치를 이용하였다. Fig.7은 분무각도에 따른 실린더내 분무 단면 형상이다. 분무각도가 60°인 경우 분사된 연료의 벽면 충돌이 거의 없으며 분무각도 45° 보다 공기와의 균일한 혼합으로 미립화가 촉진됨을 확인할 수 있다. Fig.8은 분무선단부의 진행거리에 따른 벽면 충

돌을 파악하기 위해 분사각도가 상대적으로 큰 65° 인젝터를 대상으로 실린더 반경방향의 분무 가시화 결과이다. TDC로부터 20mm 떨어진 지점에서도 벽면 충돌이 존재하지 않고, 속이 빈 원초형상을 뚜렷이 보여주고 있으며 하류로 갈수록 미립화가 촉진됨을 보여주고 있다.

### 3.2 속도 및 입경측정

분무의 특성 인자 측정시 각 분무조건에서 사이클 변동에 가장 크게 영향을 미칠 것으로 추정된 것은 연료라인의 압력변동이다. Fig.9는 세가지의 압력조건에서 샘플링한 분사속도를 나타내며 본 연구에서 채용한 Common Rail형의 직분식 고압연료 시스템의 우수한 압력 조절 기능으로 각 사이클 조건에서 비교적 안정된 분무를 확인할 수 있었다.

Fig.10은 분사압력 50bar, 분사기간 1ms로 분사시 분무의 과도특성을 보기 위하여 분무선단의 하류 10, 30, 60mm에서 간헐 분사한 다수 사이클의 입자의 속도와 크기를 시간 분해(Time-Resolved)한 결과이다. 인젝터 선단에서 하류로 갈수록 분무주류의 이동과 함께 공기의 저항 및 유입에 의하여 최고속도가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 분무입자의 크기는 인젝터 선단에서 가장 크며 하류로 갈수록 주변공기 유입에 의한 미립화 효과에 의하여 그 크기는 작아지며 분무주류의 이동에 의해 분사 종료후에도 작은 입경의 분무입자가 계속되고 있고 이러한 결과는 분무 가시화 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 속도와 입자크기 사이의 관계는 인젝터 선단에서 10mm 떨어진 영역까지는 약간의 선형적인 관계를 보이나, 하류로 갈수록 분무의 스월 유동에 의한 공기의 유입증대로 분무가 분열되어 크기가 작고 속도가 느린 입자가 대부분을 차지한다. 실린더 내 후기분사에 의한 층상급기를 이용하는 경우 엔진적용을 위한 분무특성 중에 가장 영향을 미치는 인자로 분무의 적절한 충돌거리와 함께 분무 운동량에 관심이 모아지고 있다.<sup>9),10)</sup> 피스톤의 연료분무 충돌면이 실린더 내의 유동에 의한 간섭으로 변화되어 충돌의 정확도가 떨어지는 것을 피하고, 피스톤에 충돌된 후에 연료의

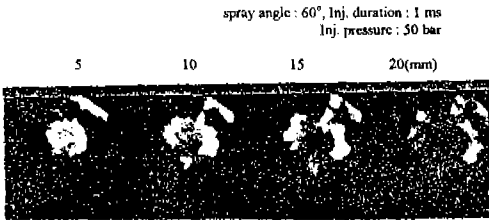


Fig.8 Visualization Photograph of Spray Cross Section in Cylinder at Various Positions from TDC

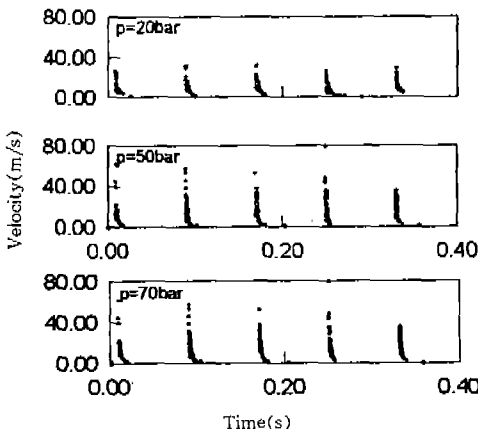


Fig.9 Spray Velocity as a Function of Time at Various Injection Pressures

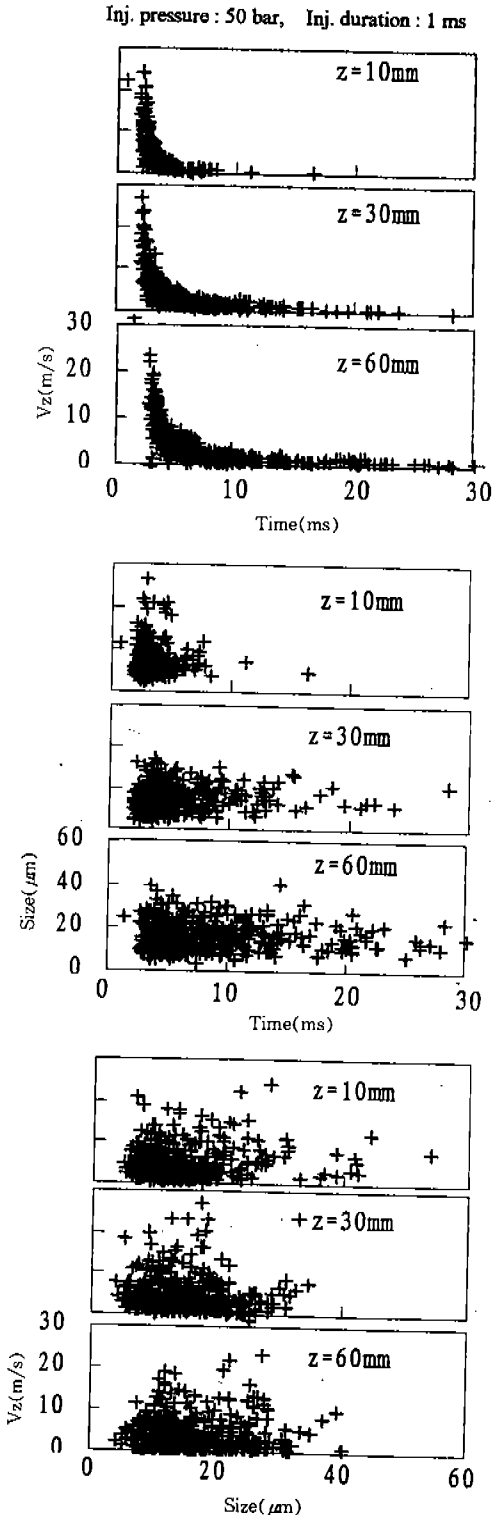


Fig.10 Spray Histories of Velocities & Size

반사가 충분하여 스파크플러그 주변에 성층연료가 잘 조성되게 하고, 또한 연료 벽류의 흠어짐으로 피스톤면에 계속 잔류하고 있는 연료를 풀여 HC를 저감하기 위해서는 충분한 운동량이 필요하다. Fig.11은 분사압력 50bar, 분사기간 1ms로 분사시 인젝터 선단을 원점으로 하여 분무 축 방향(Z)으로 10, 30, 60mm에서 운동량의 시간에 따른 변화선도이다. 분무초기의 운동량은 인젝터 선단에 가장 가까운 Z=10mm 지점에서 가장 크며 하류로 갈수록, 분무주류의 이동과 함께 공기 저항 및 유입동에 의해 그 최고 크기는 다소 작아지나 주 운동량은 변화가 없으며 가시화 결과에서 관찰된 것과 같이 분무의 구조는 계속 유지되고 있음을 알 수 있다.

분무위치 및 분사압력에 따른 입자의 SMD 및 속도를 Fig.12, 13에 나타내었다. 분무상류에서는 분무주류에 크기가 큰 입자들이 존재하고 원추 중앙에는 연료 입자의 유입이 적으나 하류로 갈수록 공기와 연료입자의 강한 혼합으로 분무주류와 원추중앙의 입자크기 및 속도가 균일해지고 있다. 반경방향의 속도가 Z=30mm에서 원추 중

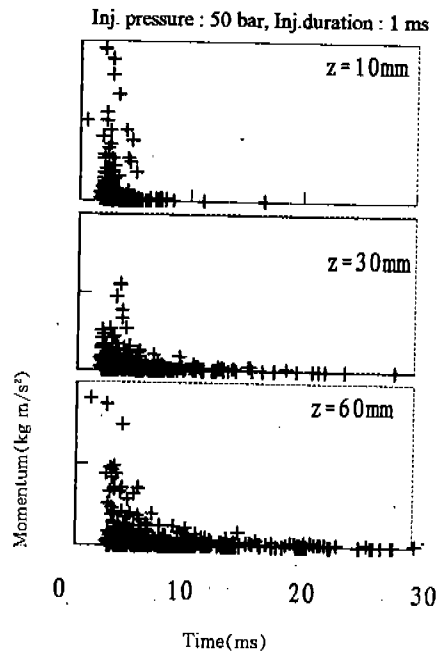


Fig.11 Cumulative Momentum-Time Trace

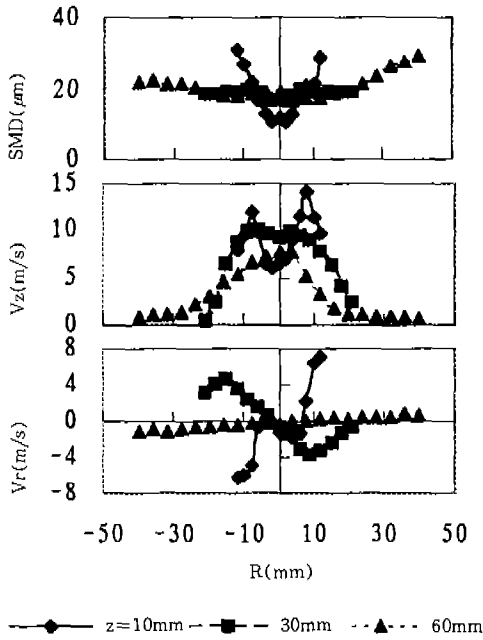


Fig.12 Radial Distribution of SMD and Velocity at Various Measuring Positions

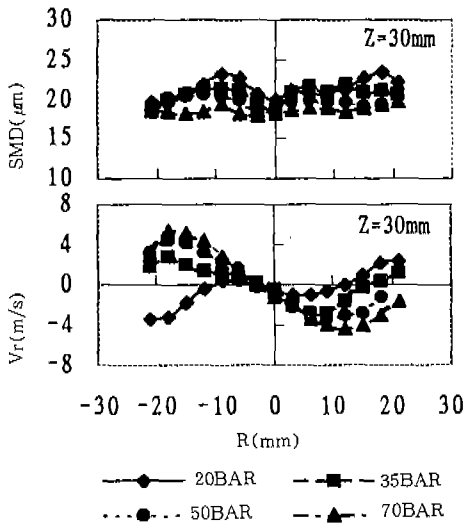


Fig.13 Radial Distribution of SMD and Velocity at Various Injection Pressures

심으로 향하고 있음을 볼 때 스웰 유동에 의한 공기의 유입이 분명히 존재함을 확인할 수 있다.

분사압력의 증가로 SMD의 저감이 가능하였으나 저감의 효과는 원추형 분무형상을 가진 인젝터의 특성상 적었으며, 분사압력에 따라 공기가 유입되는 위치도 변하며 고압의 경우 공기유입이 되는 위치가 상류로 접근되고 유입 속도도 크을 알 수 있다.

3.3 직분식 엔진의 연소 특성

가솔린 직분식 인젝터의 엔진성능을 밝히기 위해 직접분사식 단기통엔진을 제작하였다. 이로부터 냉시동시나 과도운전시의 배기가스 저감에 효과적인 이혼공연비의 균일혼합기를 이용하는 조기 분사방식을 대상으로 엔진실험을 수행하여 직분식 인젝터의 분사압력 및 분사각 그리고 분사 시기에 따른 엔진성능 및 배기가스 배출 특성을 조사하였다.

연료압력을 50bar로 설정하고 1500rpm, 1.5bar BMEP 조건에서 연료분무각이 20, 40, 60°

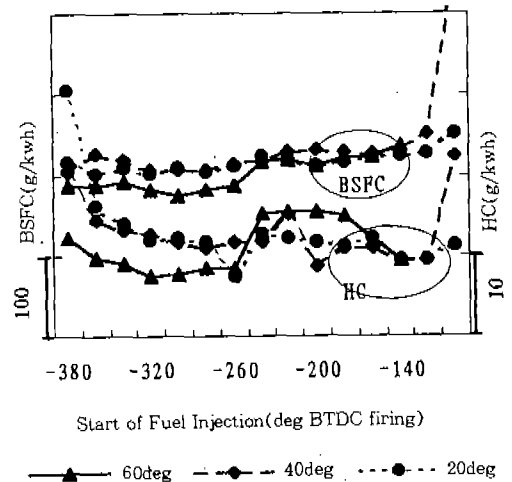


Fig.14 BSFC and HC Emission as a Function of Injection Timing at Various Spray Angles

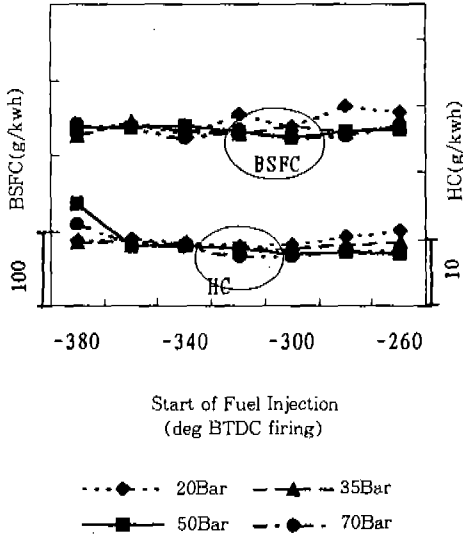


Fig.15 BSFC and HC Emission as a Function of Injection Timing at Various Injection Pressures

인 연료 인젝터를 대상으로 Fig.14에서 보는 바와 같이 이론공연비 상에서 분사시기 변화에 따라 연료소비율 및 탄화수소(HC) 배출량 비교실험을 수행하였다. 분무각도에 따른 연료 소비율은 분무입경이 작아 혼합기 형성에 가장 유리한 분무각 60°의 경우가 가장 좋게 나타났다. 탄화수소 배출량에 있어서 흡기행정 초기에 분사하는 경우 분사연료의 입경이 가장 작은 분무각 60°의 경우가 미립화 및 기화촉진 효과 등에 의해 가장 적은 탄화수소를 배출하였다. 흡기행정 후기에 분사하는 경우는 분사연료의 분무각이 가장 작은 20° 경우가 벽류의 감소로 상대적으로 탄화수소 배출량이 적음을 보여주고 있다.

Fig.15는 분무각 60°를 대상으로 분사압력 및 분사시기 변화에 따른 연료 소비율 및 탄화수소(HC) 배출 결과이다. 분사압력이 상대적으로 높은 50, 70bar의 경우에 연료소비율이 다소 유리함을 나타내고, 탄화수소의 경우 피스톤의 상승시 분사하는 경우(380° BTDC)가 상대적으로 벽류의 가능성이 커서 고압분사의 이득이 나타나지 않으나 기화시간이 충분하지 않은 후기 분사

에서는 고압분사에 의한 미립화 촉진 및 분사기간 단축이 탄화수소 저감에 기여함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

연비향상 및 냉시동시와 과도운전시의 배기가스 저감에 효과적인 직분분사식 가솔린 엔진개발을 위해 직분식 인젝터의 분무 패턴 가시화, 분무 입경 및 속도 측정 등의 실험을 통하여 분무 특성을 파악하고, 단기통 엔진에서의 성능실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분무 주류의 하류에 강한 화류(Vortex)를 형성하며, 분무의 스월 유동에 의한 공기 유입증대로 미립화에 효과적인 원추형 분무 형상을 갖는 스월 인젝터의 분무구조를 가시화로 부터 확인할 수 있었으며, 이 경우 인젝터의 분무각도 및 분사압력이 클수록 공기와의 접촉 면적 증가 및 미립화 증대로 균일 혼합기 형성에 유리하여 HC 저감이 기대된다.
- 2) 흡입과정 초기에 연료를 분사하는 조기 분사식의 경우 분무연료에 대한 공기 유동의 영향을 파악하기 위해 석영 실린더를 이용한 정상류 장치로부터 분무가시화를 수행하였다. 흡입과정에 연료를 직접 분사시 고압분사로 인해 흡입유동에 의한 분무 형상 차이는 적음을 알 수 있었으며 분무의 벽충돌 유무를 파악하므로써 인젝터 종류 및 삽입 위치등을 결정하기 위한 기초자료를 얻을 수 있었다.
- 3) 스월 인젝터의 분무 입경, 속도 측정으로부터 Common Rail형 직분식 연료시스템의 우수한 압력 조절 기능으로 각분사 사이클마다 분무입자의 속도 변동이 적음을 알 수 있었다. 분무의 상류에서는 하류에 비해 상대적으로 입자의 속도 및 크기가 큰 입자들이 존재하며 그 최고 속도 및 크기는 30m/s 및 SMD 30 $\mu$ m 이내이며 하류로 갈수록 스월 유동에 의한 연료와 공기의 혼합으로 원추형 분무의 주류와 중심부의 입자 속도



와 크기는 적어지고 있다. 또한 반경방향의 속도가 원추중심으로 향함을 볼 때 스월 유동에 의해 공기의 활발한 유입이 존재함을 확인 할 수 있었다.

- 4) 직접분사식 균일혼합연소에 있어서 분사압력이 높으면서 연료분무각이 충분히 크고 실린더 벽면 및 피스톤에 부딪히지 않는 범위 내에서 분사하는 것이 균일혼합기 형성에 유리하여 연료 소비율 및 탄화수소(HC) 배출에 있어서 유리하였다.

### 참 고 문 헌

1. Chulho Yu, Taehoon Kim, Yonggyun Yi, Juheon Lee, Seokhong Noh, and Kyuhoon Choi, "Development of KMC 2.4L Lean Burn Engine", SAE paper No.950685.
2. "直噴 ガソリン 엔진 Toyota D-4 & Mitubishi GDI", 自動車工学, Japan, 1996.
3. Tateo Kume, Hiroshi Tanada, Kazumasa Iida, Nobuaki Murakami, Hiromitsu Ando, "Combustion control Technologies for Direct Injection Engines", SAE paper No. 9631948.
4. N. S. Jacson, J. Stokes, P. A. Whitaker, T. H. Lake, "A Direct Injection Stratified Charge Gasoline Combustion System for Future european Passenger Cars", I. Mech E. Lean Burn Combustion Engines Seminar, 1996.
5. T. Kume, Y. Iwamoto, K. Iida, M. Murakami, K. Akishino & H. Ando, "Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engines", SAE paper No. 960600.
6. Naehyun Lee, Chulho Yu et al., "An Experimental Study on the Development of Stoichiometric Direct Injection Gasoline Engine", 기관, 공해, 연료 및 윤활유 부문 학술강연회, KSAE, 1996.
7. Chulho Yu, Jongho Park, Naehyun Lee, Kyuhoon Choi, "An Study on the Spray and Combustion Characteristic of Gasoline Direct Injector", 추계학술대회, KSAE, 1996.
8. Kazunari Kaneshima et al., "Improvement of Reliability of Measurement of Spray by the Phase Doppler Particle Analyzer", HONDA R&D Technical Review, Japan, 1995.
9. Ja-Ye Koo, "Droplet Sizes and Velocities in a Transient Diesel Fuel Spray", SAE paper No.900397.
10. Fu-Quan Zhao et al., "The Spray Characteristics of Automotive Port Fuel Injection -A Critical Review", SAE paper No. 950506.