

직분식 가솔린 인젝터의 분사 조건에 따른 분무 특성 분석

An Investigation of the Spray Characteristics according to Injection Conditions for a Gasoline Direct Injector

이 기 형*, 이 창 식*, 이 창 희**, 류 재 덕**, 배 재 일***
Kihyung Lee, Changsik Lee, Changhee Lee, Jeaduk Ryu, Jaeil Bae

ABSTRACT

Recently GDI(Gasoline Direct Injection) engine is spotlighted to achieve higher thermal efficiency under partial loads and better performance at full loads. To realize this system, it is essential to make both stratified combustion and homogeneous combustion. When compared to PFI(Port Fuel Injection) engine, GDI engine needs more complicated control and optimal design with injection system. In addition, spray pattern must be optimized according to injection timing because ambient pressure in combustion chamber is also varied. Thus spray structure should be analyzed in details to meet various conditions. In this experimental study, two types of visualization system were developed to simulate compression stroke and intake stroke, respectively. With an increase of the ambient pressure, the penetration length tends to decrease due to rising resistance caused by the drag force of the ambient air. Spray characteristics impinged on the piston has a significant effect on mixture stratification around the spark plug. These results provide the information on macroscopic spray structure and design factors for developing GDI injector.

주요기술용어 : GDI injector(가솔린 직분식 인젝터), Penetration(분무도달거리), Spray angle(분무각), Injection pressure(분사 압력), Ambient pressure(분위기 압력)

1. 서 론

최근 연비규제와 배기규제를 동시에 만족시킬 수 있는 기술로서 주목받고 있는 GDI엔진의 경우, 운전 조건에 따라 분사시기를 제어하는 시스템을 채용하고 있다.¹⁾ 이러한 직분식 엔진의 성능은 흡기행정 중의 균일한 혼합기 형성

과 압축행정 중의 혼합기 성층화에 최적한 분무 형상에 의하여 좌우된다고 알려져 있다.²⁻⁴⁾ 따라서 GDI용 인젝터로부터 분사된 연료의 미립화 정도와 성층화에 적합한 분무 형상 및 인젝터 부착위치, 그리고 실린더 벽면과 피스톤 크라운 면에 대한 연료 충돌 특성 등과 같은 GDI용 인젝터의 분무 특성을 파악하는 연구가 무엇보다 중요하다.

본 연구에서는 서로 다른 분무 형상을 가진 세 종류의 GDI용 인젝터에 대한 분무 미세구

* 회원, 한양대학교 기계공학과
** 회원, 한양대학교 대학원
*** 회원, (주) 캐피코

조와 흡기 행정시의 분무 성장 과정을 가시화하였고, 피스톤 크라운 면에 충돌된 분무의 거동을 분석하여 성층화에 적합한 인젝터 분사각도와 위치에 대한 기초 자료를 확보하였다. 이와 같은 실험을 통하여 GDI용 인젝터 설계시 요구되는 분무 형상과 분사 조건에 따른 인젝터의 분무 특성을 파악하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 분무단면 가시화 실험장치

분위기 압력 변화와 피스톤 충돌후의 분무 형상을 정확하게 파악하기 위하여 Fig. 1과 같은 분무 가시화 시스템을 구성하였다. 광원으로는 Nd:YAG 레이저(Surlite I-10, Continuum)를 사용하였으며, 최대 출력과 파장은 각각 200mJ, 532nm이고, 유도된 레이저 쉬트빔(sheet beam) 두께는 2mm이다. 화상취득 장치(CCD : XC-77 RR, Sony)는 화상 분해능이 760(H)×493(V)이고, 셀 크기는 11(H)×13(V) μm 이며, 8bit의 640(H)×480(V)인 유효화상을 취득할 수 있는 이미지 보드(MeteorRGB, Matrox)를 사용하였다. 또한 레이저와 분사신호의 동기를 위하여 피코(pico)단위의 시간 분해능을 가지는 4채널 디지털 펄스 발생기(DG535, SRS)를 사용하였으며, 인젝터 구동 드라이버는 자체 제작한 드라이버를

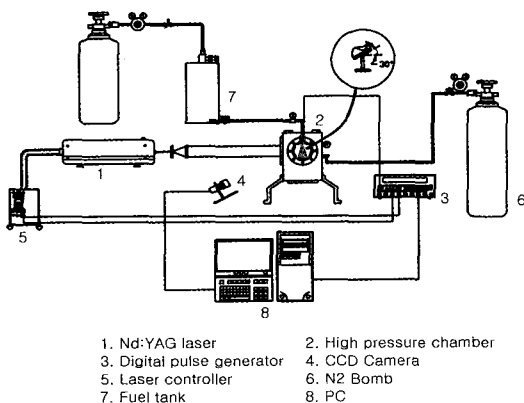


Fig. 1 Visualization system of GDI spray at simulated compression stroke

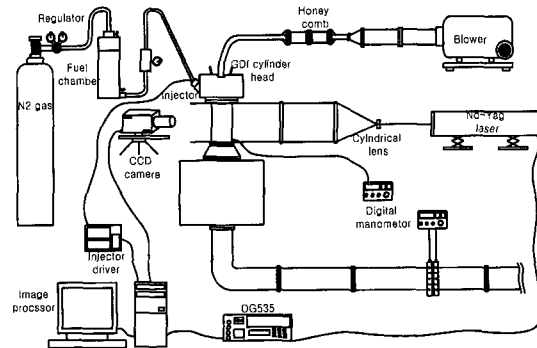


Fig. 2 Visualization system of GDI spray at simulated intake stroke

사용하였다. 주변 분위기 압력 변화에 따른 분무 거동 가시화를 위하여 고압 챔버와 다양한 인젝터를 설치할 수 있는 인젝터 어댑터를 제작하였다. 또한 고압챔버내에는 모사 피스톤 충돌판을 설치하였고, 피스톤의 각도 및 위치를 조절할 수 있도록 조절 나사를 장착하였다.

Fig. 2는 흡기 행정 분사시의 분무 형상 및 혼합기 분포를 파악하기 위하여 구성한 가시화 시스템을 나타낸다. 흡기 행정 모사 실험을 수행하기 위해 인젝터 부착용 실린더 헤드에 측면(side) 분사와 중심(center) 분사를 할 수 있도록 인젝터 홀더를 제작하였다. 흡입 유량을 측정하기 위해 자체 제작한 오리피스를 이용하여 흡입유량을 측정하였고, 흡입 차압은 디지털 마노메타를 이용하여 측정하였다. 가시화 시스템은 Fig. 1에서 설명한 광학 장치를 이용하여 실린더의 중앙 단면으로 Nd:YAG 레이저의 쉬트빔을 조사한 후 CCD를 이용하여 분무 단면의 화상을 취득하였다.

2.2 실험조건 및 인젝터의 성능 지표

본 연구에서 사용된 인젝터는 세 종류로서 각각의 사양은 Table 1과 같으며 분사기간은 3msec로 일치시켰다. 본 실험에서 사용한 인젝터의 분무 특성 인자는 Fig. 3과 같이 정의하였으며, 분무의 지연시간이 다르기 때문에 분무가 시작되는 시간을 기준으로 분무 패턴 및 특

Table 1 Specification of GDI injectors

Injector	Spray factor	Injection pressure	Spray pattern	Offset angle (Φ_2)	Swirl ratio
A		10MPa	solid	19°	0
B		10MPa	solid	0°	0.44
C		10MPa	solid	0°	0.48

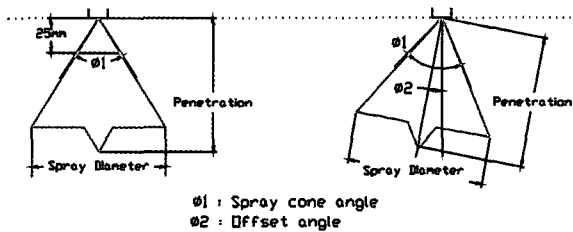


Fig. 3 Definition of spray characteristics

성을 파악하였다.⁵⁾

3. 실험결과 및 고찰

3.1 대기 분사시의 분무 특성

Fig. 1에 나타낸 분무 가시화 시스템을 이용하여 측정된 세 종류의 인젝터의 시간 경과에 따른 분무 성장 및 구조를 비교한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4의 A 인젝터는 offset 각도인 19°방향으로 편재되어 분사되고 있는 반면, B와 C는 축방향으로 대칭인 분무 형태를 보이고 있다. 또한 분무 끝단에서 A 인젝터 보다 B,C 두 인젝터가 다소 큰 와(vortex) 영역을 형성하고 있는데, 그 이유는 노즐 출구에 설치된 스윌러(swirler)에 의한 영향으로 판단된다. B와 C 인젝터는 Table 1에서 나타낸 바와 같이 스윌비의 차이가 작기 때문에 와의 형상에는 큰 변화가 없음을 확인할 수 있었으나, 세 종류의 인젝터에 대한 시간에 따른 분무 도달 거리를 나타낸 Fig. 5로부터 스윌비가 큰 C가 B 인젝터보다 분무 도달 거리가 짧은 경향을 나타내었다. 반면 A 인

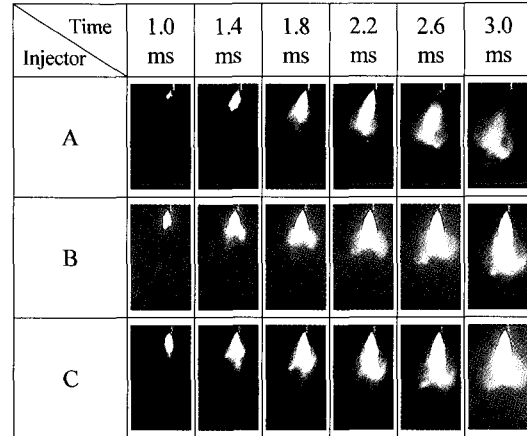


Fig. 4 Comparison of spray patterns (ambient pressure : 0 MPa)

젝터의 경우, 분무 도달거리가 선형적으로 급격히 상승함을 보이고 있는데, 그 이유는 다른 두 인젝터 보다 분무각이 작기 때문에 공기와의 접촉 면적이 감소하므로 축방향으로의 관통력이 증가하여 분무 도달거리가 길어졌다고 판단된다. 이러한 결과로부터 노즐 출구의 스윌 각도는 분무각을 증가시키고 분무 선단의 와류 형성에 영향을 주는 반면 분무 도달거리는 감소시키는 역할을 함을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 다른 연구 결과^{6,7)}들과도 경향이 일치하

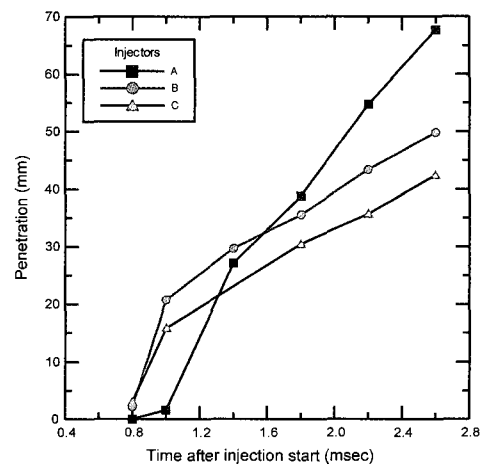


Fig. 5 Comparison of penetrations (ambient pressure : 0MPa)

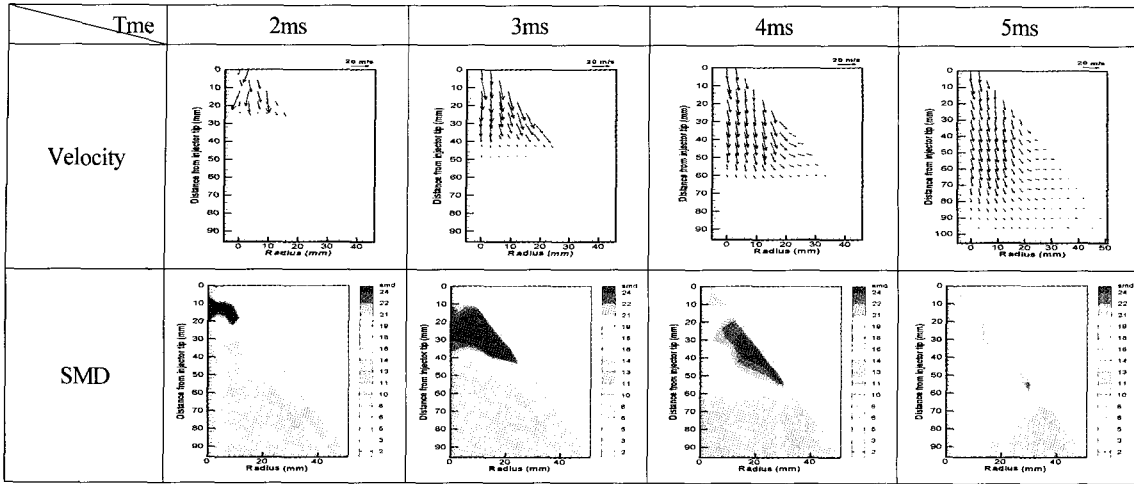


Fig. 6 The distribution of droplet velocity and SMD (ambient pressure : 0MPa)

고 있다.

Fig. 6은 입경 측정 장치(PDA)를 이용하여 A 인젝터에 대해 분사압이 10MPa일 때 분사 시간 변화에 따른 분무 속도 분포 및 입경 분포를 측정한 그림이다. 속도 분포의 경우, 앞서 가시화 결과에서 나타난 바와 같이 분무 끝단에서 vortex가 발생하는 영역을 확인할 수 있었다. 입경 분포의 경우, 인젝터 출구 부근에서 SMD가 크게 나타나고 있지만 시간이 경과함에 따라 분무 주 방향 외곽 부분의 SMD가 크게 나타나는 경향을 보인다. 이러한 현상은 정지되어 있는 공기에 연료 입자가 도달하여 순간적으로 속도가 감소되어 입자들의 합착에 의해 SMD가 크게 나타난 결과라고 사료된다. 그 후 분무가 완전히 발달된 시기에는 주위 공기와의 혼합이 충분히 이루어져서 매우 작은 입경들이 고르게 분포되고 있는 경향을 보이고 있다.

3.2 주변 분위기 압력 변화시 분무 특성

각각의 인젝터에 대하여 분사 압력을 10MPa로 고정하고, 주변 분위기 압력 변화에 따른 분무 가시화 이미지를 Fig. 7에 나타내었고, Fig. 8은 분위기 압력이 0.6MPa인 경우 시간 변화에 따른 분무 도달거리를 나타내었으며, 분위기 압력 변화에 따른 분무각의 변화를 Fig. 9에 나

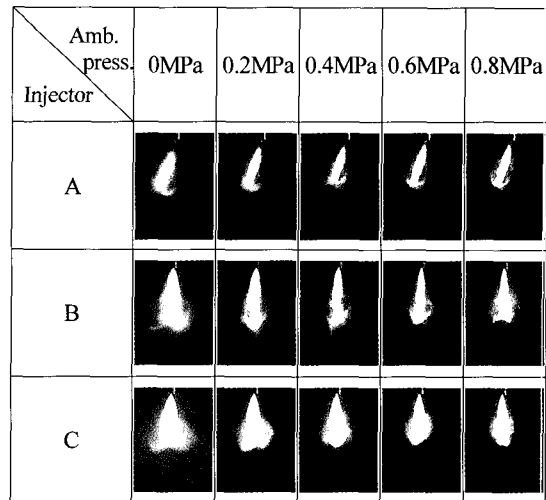


Fig. 7 Comparison of spray patterns

타내었다.

실험에 사용된 세 종류의 인젝터 모두 주변 분위기 압력이 상승함에 따라 분무 도달거리 및 분무각이 감소하였다. 특히 Fig. 8을 통해 보면, 인젝터 A는 주변 분위기 압력 하에서 다른 두 인젝터 보다 분무 도달거리가 급격히 성장함을 보이고 있다. 그 이유는 대기 분사시와 다 찬가지로 분무각이 작기 때문에 공기와의 접촉 면적의 감소에 따라 분무 도달거리가 길어졌다고 사료된다. 이러한 결과로부터 노즐 출구의

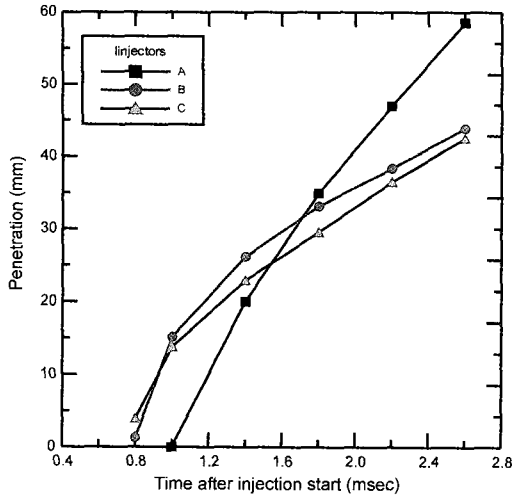


Fig. 8 Comparison of penetrations (ambient pressure : 0.6MPa)

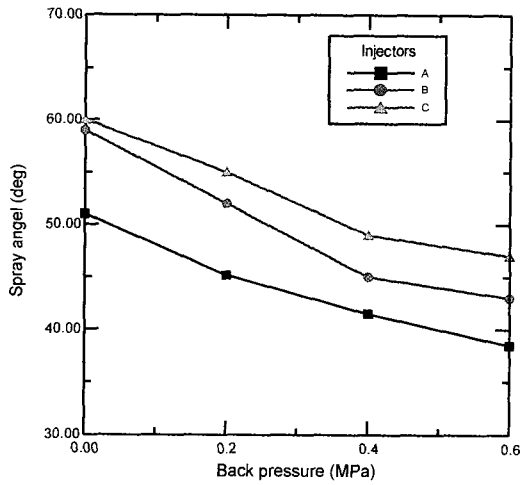


Fig. 9 Comparison of spray angles

스웰각도는 분무각을 증가시키고 분무 선단의 와류 형성에 영향을 주는 반면 분무 도달거리 는 감소시키는 역할을 함을 알 수 있다. 즉 분 무와 공기의 마찰에 기인하여 분무 도달거리와 분무각은 서로 상반되는 관계에 있음을 나타내 고 있다.

3.3 분무 충돌시 연료거동 특성

챔버내의 압력이 0.6MPa이고 연료 분사압이

10MPa인 경우에 대하여 인젝터와 30°각도로 모 사 피스톤을 설치하여 분무 충돌 실험을 수행 하였다. Fig. 10은 A와 B 인젝터에 대한 분무 충돌후의 연료 거동을 비교한 결과이다. A 인젝터의 경우, Fig. 3의 분무 형상에서 알 수 있는 바와 같이 offset 각도가 있으므로 B 인젝터에 비해 피스톤 크라운 면에 연료가 넓게 접촉 하고 있으며, 연료가 연소실내에 고르게 분포 된 채로 시간이 경과함에 따라 피스톤 좌측 끝 단면으로 이동되는 양상을 확인할 수 있었다. 반면 B 인젝터의 경우 분사된 연료의 상당 부 분이 피스톤면의 일정 부위에 충돌된 후 시간 경과에 따라 분무의 선단부가 좌측 피스톤 면 으로 이동되는 경향을 나타내고 있다. 압축말 기 분사시의 성층화에 유리한 분사시기를 선정 하기 위하여 2000rpm 운전시의 35°BTDC와 50° BTDC일 때의 피스톤 위치에 해당하는 10mm 와 20mm 위치에 충돌판을 설치하였고 실험을 수행하였다. 또한 압축행정 말기 분사시의 희 박연소 상태이므로 분사시간은 3ms로 정하였으 며, 2000rpm으로 운전할 경우 크랭크각도 30°에

Injector		Time		
		2.6ms	3.0ms	3.4ms
A	10mm			
	20mm			
B	10mm			
	20mm			

Fig. 10 Comparison of fuel behavior after impinging to piston

해당하므로 피스톤의 위치변화를 무시될 수 있다고 사료된다. 각 인젝터에 대해 충돌관 위치에 따른 분무 충돌후의 연료의 거동을 비교해보면 시간이 경과하면 피스톤 크라운 면을 따라 연료가 이동되는 모습이 충돌관 위치가 10mm인 경우보다 20mm인 경우에서 선명하게 관측되고 있다. 이 결과로부터 분사 시기가 너무 늦어지면 분사된 연료의 대부분이 피스톤 면에 충돌되어 운동량이 소멸되므로 피스톤 면을 따라 점화 플러그 방향으로 이동되는 연료 거동이 감소됨을 알 수 있다.

3.4 흡입 행정 분사시의 인젝터의 분무특성 파악

Fig. 2에서 보인바와 같은 흡입 행정 분사를 모사한 정상유동 가시화 시스템을 이용하여 B 인젝터에 대한 분무 거동을 파악하였다. 인젝터는 연소실 중심면과 측면에 부착시켰으며,

분사압은 8MPa로 고정하였고, 흡입 차압은 350 mmH₂O로 유지하였으며, 오리피스를 이용하여 일정유량을 공급하였다. 밸브 리프트 변화와 인젝터 부착 위치에 따른 연료 거동을 가시화한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 측면 분사의 경우 밸브 리프트가 큰 8mm인 경우에 분무 도달거리가 길어짐(64.5mm)을 확인할 수 있었다. 반면, 밸브 리프트가 4mm인 경우 흡기 밸브 출구 부근의 분무 형태가 다소 확산되고 있으며, 분무 형태가 시간 경과에 따라 바깥쪽으로 휘어지는 양상을 보이고 있는데, 이는 좁은 밸브 리프트를 통하여 유입되는 빠른 흡입 유동에 의한 결과라고 사료된다. 또한 8mm인 경우 시간경과에 따라 분무 형상이 유동 방향으로 휘어짐을 확인할 수 있으며, 4mm인 경우보다는 8mm일 때 텀블 유동에 더욱 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 반면 중심 분사의 경우 전체적으로 실린더 벽에 벽류를 형성하는 것을 볼

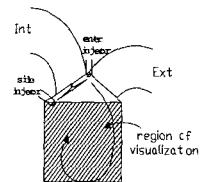
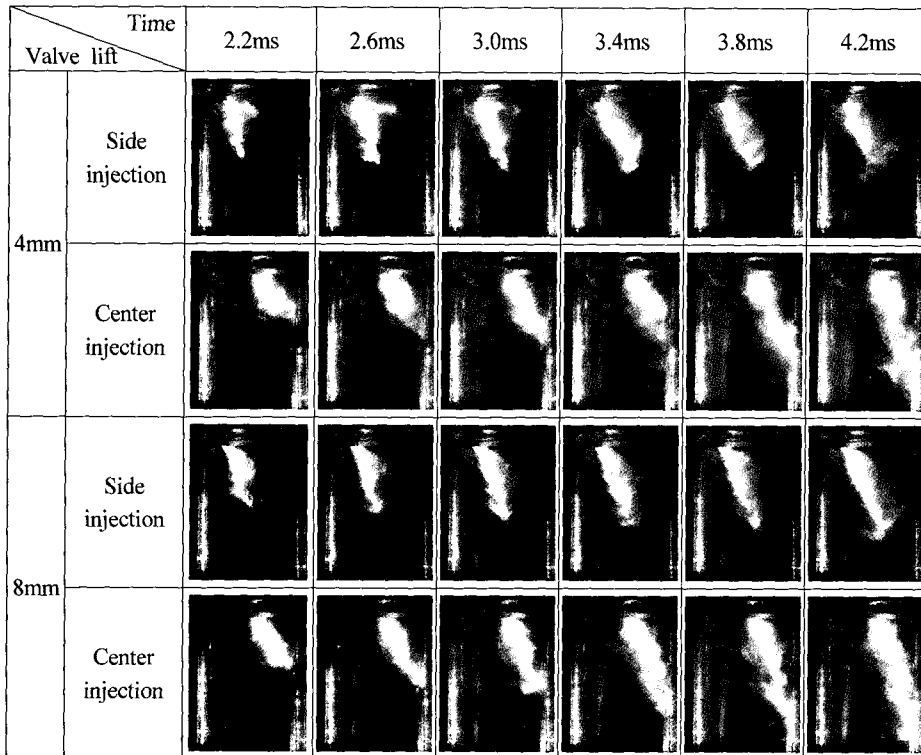


Fig. 11 Comparison of fuel behavior between two valve lifts to injection locations

수 있었다. 그 이유는 분사된 연료가 밸브 리프트를 통해 유입되는 텀블 유동장에 수반되었기 때문이라 사료된다. 이러한 결과로부터 인젝터를 연소실 중심에 부착할 경우의 벽류 현상을 감소시키기 위하여는 인젝터의 분무 형상에 offset 각을 설치하는 것이 실린더 라이너 벽에 부착되는 벽류 발생을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 실린더 직경 80.5mm와 스트로크 88.4mm인 엔진에 적용할 경우, 측면 분사 또는 offset 각을 가진 인젝터를 이용하여 중심에서 분사하면 벽류 발생이 적을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 레이저를 이용한 분무 가시화 기술을 확립하여 GDI용 가솔린 인젝터의 분무 특성 및 흡기 행정 분사시의 연료 거동을 파악하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 세 종류의 인젝터에 대한 분무 특성 비교 결과, A 인젝터는 분무각이 작고 다른 두 인젝터보다 공기와의 접촉면적이 작기 때문에 분무 도달거리가 길었다. 또한 스웰비에 따른 분무 형상은 스웰비가 큰 C인젝터의 경우에 분무각은 크고, 분무 도달 거리는 감소하였다.

2) GDI용 인젝터의 미립화 과정을 분석한 결과, 입경 분포는 노즐 출구 부근에서 크게 나타났으며, 속도가 작은 영역에서 입자의 합착이 발생하여 시간이 경과함에 따라 분무 끝단 쪽으로 큰 입경분포 영역이 이동한 후 완전한 분무 성장시에는 고르게 작은 입경이 분포됨을 확인하였다.

3) 충돌시 분무 특성 가시화 결과, 압축행정 말기 분사시 연료의 성층화를 이루기 위하여는 충돌판의 설치 위치와 인젝터의 offset 각이 연료 성층화에 큰 영향을 미친다는 사실을 확인하였다.

4) 흡입 행정 분사시의 분무 특성을 가시화한 결과, 밸브 리프트 길이가 8mm인 경우 4

mm보다 텀블의 영향이 큰 것을 확인할 수 있었고, 분무 도달거리도 증가함을 알 수 있었다. 또한 이 인젝터를 80.5mm×88.4mm인 엔진에 적용시 측면 분사할 경우 흡입행정 분사시의 벽류 저감이 기대된다.

후 기

본 연구는 ERC(연소기술연구센터) 사업의 연구비에 의해 수행된 연구결과로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 포함합니다.

참 고 문 헌

- 1) F.-Q. Zhao and M.-C. Lai, "A Review Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignition Direct-Injection Gasoline Engines", SAE 970627, 1997.
- 2) Y. Iwamoto, K. Noma et. al., "Development of Gasoline Direct Injection Engine", SAE 970541, 1997.
- 3) Y. Iwakiri, A. Kakuko et. al., "Effectiveness and Issues of Various Measurement Techniques Used in Evaluating Spray Characteristics in a Direct-Injection Gasoline Engine", Proceeding of The 15th International Combustion Engine Symposium, 9935095, pp.35-40, 1999.
- 4) N. S. Jackson, J. Stokes et. al., "Research and Development of Advanced Direct Injection Gasoline Engines", International Vienna Motor Symposium, pp.110-116, 1997.
- 5) W. Ipp, V. Wangner et. al., "Spray Formation of High Pressure Swirl Gasoline Injectors Investigated by Two-Dimensional Mie and LIEF Techniques", SAE 1999-01-0498, 1999.
- 6) F.-Q. Zhao, J.-H. Yoo et. al., "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engine", SAE 961925, 1996.
- 7) T. N., Takatshi Shiraishi et. al., "Stability Improvement of Direct Fuel Injection Engine under Lean Combustion Operation", SAE 982703, 1998.