

직분식 가솔린 인젝터의 흡입 행정 분사시의 연료 거동 및 혼합기 분포 특성에 관한 연구

이창희[†] · 이기형^{*} · 배재일^{**} · 백승국^{**}
(2002년 1월 10일 접수, 2002년 5월 28일 심사완료)

A Study on the Fuel Behavior and Mixture Formation in the Early Injection Timing of GDI Injector

Changhee Lee, Kihyung Lee, Jaeil Bae and Sungkuk Back

Key Words: GDI Injector(가솔린 직분식 인젝터), Penetration(분무도달거리), Spray Angle(분무 각), Injection Pressure(분사 압력)

Abstract

Recently GDI(Gasoline Direct Injection) engine is spot-lighted 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. Spray pattern must be optimized according to injection timing because ambient pressure in combustion chamber is varied with crank angle. In this experimental study, two types of visualization system such as laser scattering method and schlieren method were developed to clarify the spray behavior during on intake stroke. As the ambient pressure increases, the penetration length and spray angle show a tendency to decrease due to rising resistance caused by the drag force of the ambient air. Distribution of injected fuel on intake stroke has a significant effect on homogeneous mixture in the cylinder. These results provide the information on macroscopic wall-wet growth in the cylinder and design factors for developing GDI injector.

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 흡기 행정 중의 균일한 혼합기 형성과 압축 행정 중의 혼합기 성층화에 최적한 분무 형상에 의하여 좌우된다고 알려져 있다.^(2~4) 따라서 GDI

용 인젝터로부터 분사된 연료의 미립화 정도와 성층화에 적합한 분무 형상 및 인젝터 부착위치, 그리고 고부하시 연료 액적의 실린더 벽면 부착을 최소화하는 기술을 개발하는 연구가 무엇보다 중요하다.

본 연구에서는 서로 다른 분무 형상을 가진 두 종류의 GDI용 인젝터에 대한 흡기 행정시의 분무 성장 과정을 가시화하였고, 슈리렌 방법을 이용하여 실린더 라이너에 부착되는 벽류(wall-wetting) 현상과 분무의 거동을 분석하여 균일한 혼합기에 적합한 인젝터 분사각도에 대한 기초 자료를 확보하였다. 또한 본 연구에서 설정한 실험조건(흡입 차압과 밸브리프트)을 통해 흡입 유량 변화에 따라 인젝터 분사각 및 밸브 리프트의 관계를 도출하여 엔진내의 혼합기 분포 및 벽류 특성을 파악하였다. 이와 같은 실험을 통하여

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과
E-mail : leemech@ihanyang.ac.kr
TEL : (031)400-4064 FAX : (031)406-5550

^{*} 한양대학교 기계공학과

^{**} (주) 케이코

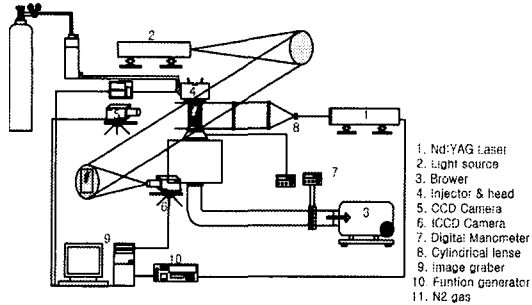


Fig. 1 Schematic diagram of mie-scattering and schlieren method

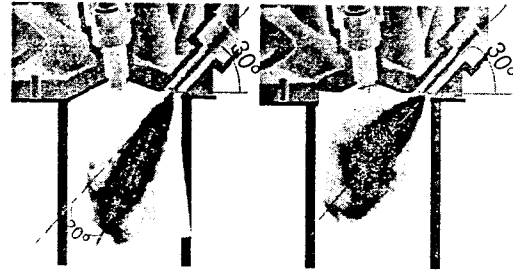
GDI용 인젝터 설계시 요구되는 분무 형상과 분사 조건에 따른 인젝터 부착 위치 및 분무의 벽류 현상을 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 흡입 행정 모사 가시화 실험 장치

Fig. 1은 흡입 행정 분사시의 분무 형상을 모사한 레이저 가시화(Mie-scattering method) 시스템 및 슈리렌(Schlieren method) 방법을 이용한 흡입 행정 분사시의 액·기상 분포를 파악하기 위하여 구성된 가시화 시스템을 나타낸 그림이다.⁽⁶⁾

레이저 가시화 시스템의 광원으로는 Nd:YAG 레이저(Surlite I-10, Continuum)를 사용하였으며, 최대 출력과 파장은 각각 200mJ, 532nm이고, 유도된 레이저 시트 빔(sheet beam) 두께는 2mm이다. 화상취득 장치(CCD : XC-77RR, Sony)는 화상 분해능이 760(H)×493(V)이고, 셀 크기는 11(H)×13(V)μm이며, 8bit의 640(H) 480(V)인 유효 화상을 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 사용하였다. 흡기 행정 모사 실험을 수행하기 위해 인젝터 부착용 실린더 헤드에 측면(side) 분사를 할 수 있도록 인젝터 홀더를 제작하였으며, 흡기포트 사이에 인젝터를 부착하였다. 레이저 입사위치는 인젝터의 중앙과 흡기 밸브 중앙에 레이저를 조사하였다. 흡입 유량을 측정하기 위해 자체 제작한 오리피스를 이용하여 흡입유량을 측정하였고, 흡입 차압은



(a) A type injector (b) B type injector

Fig. 2 Schematic diagram on the adherent location and offset angle of GDI injectors

디지털 마노메타를 이용하여 측정하였다. 액상과 기상의 이미지를 동시에 측정할 수 있는 슈리렌 방법을 적용하였으며, 광원으로는 100W 제논 램프를 이용하였고, ICCD (640×480)를 이용하여 실린더 내의 액상·기상의 분무 거동을 분석하였다.

2.2 GDI 인젝터의 부착 위치

Fig. 2는 흡입 행정 분사시의 인젝터의 부착 위치 및 부착 각도를 나타낸 개략도이며, 본 연구에 사용된 GDI 엔진의 흡기 포트 형상은 직립포트를 사용하였다. Fig. 2(a)의 경우 인젝터 자체의 offset 각과 인젝터 부착각도 30°를 유지하도록 헤드 블록을 설계하였다. 또한 Fig. 2(b)의 경우는 인젝터 부착 각도 30°로 이루어져 있으며, offset 각이 없는 인젝터를 사용하였다.

2.3 실험 방법 및 조건

본 연구에서 사용된 인젝터는 두 종류로서 각각의 사양은 Table 1과 같으며, 고부하 운전 영역에서의 분사시간은 약 3msec이며, 그때의 공연비는 약 14.7이었다. 본 실험에서의 분사 기간은 3msec로 실험에 사용된 인젝터의 분무 특성 인자는 참고 문헌⁽⁵⁾에 정의된 바와 같이 정의하였으며, 분무의 지연시간이 다르기 때문에 분무가 시작되는 시간을 기준으로 분무 패턴 및 특성을 파악하였다.

밸브 리프트의 변화는 4mm에서 10mm까지 2mm 간격으로, 흡입 차압의 변화는 240mmAq에서 380mmAq까지 40mmAq 간격으로 실험조건을

Table 1 specification of GDI injectors

Injector	Spray factor	Injection pressure	Spray pattern	Offset angle
A		10MPa	Solid	20°
B		10MPa	Solid	0°

설정하여 시간에 따른 분무 발달 과정과 흡입 차압에 따른 분무 발달과정 및 벽류 발생 여부를 파악하였으며, 슈리렌 방법을 이용하여 흡기 행정 분사시의 액상과 기상의 이미지를 취득하였다.

레이저 가시화 방법과 슈리렌 방법을 이용하여 액상과 기상을 분리하여 흡입 행정 분사시의 기상의 상태를 파악하였으며, 실린더 벽면의 벽류 특성을 분석하였다.^(7,8)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 GDI 인젝터의 분무 특성

Fig. 1에서 보인 바와 같은 실험 장치를 통해 두 종류의 인젝터에 대하여 분사 압력을 100bar로 고정하고, 고압 챔버내의 분위기 압력 변화에 따른 분무 가시화 결과를 Fig. 3에 나타내었으며, Fig. 4는 분무 시간 경과에 따른 분무 도달거리와 분위기 압력 변화에 따른 분무각의 변화에 대해 나타내었다.

Fig. 3은 A와 B 인젝터에 대한 주변 분위기 압력 변화에 따른 분무 가시화 결과로서, 주변 분위기 압력이 증가함에 따라 분무 도달거리와 분무각이 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 4는 분무 시작후 시간 경과에 따른 분무 도달거리 및 분위기 압력 변화에 따른 분무각의 변화를 나타낸 결과로서, 분사 시작후 시간이 경과함에 따라 분무 도달거리가 증가함을 알 수 있었으며, 분위기 압력이 증가함에 따라 A와 B 인젝터의 분무각은 선형적으로 감소하였다. 인젝터 A의 경우는 분무각이 작기 때문에 상대적으로 공기와 접촉 저항이 작아지므로 분무 도달거리가 상대적으로 크다고 사료된다.

Fig. 3과 4의 분무 특성을 비교한 결과로부터 분무와 공기의 마찰에 기인하여 분무 도달거리와 분무각은 서로 상반되는 관계(trade-off)에 있음을 나타내고 있다.

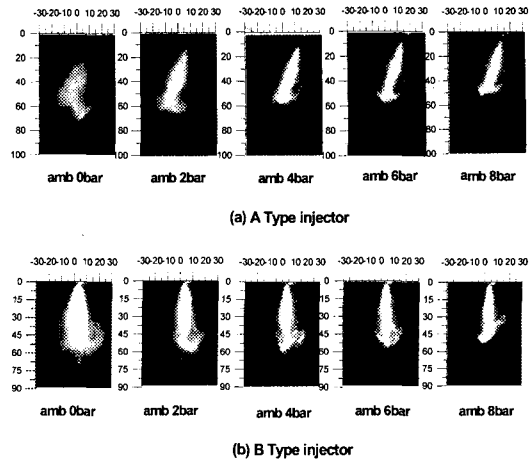


Fig. 3 Comparison of spray patterns according to ambient pressure

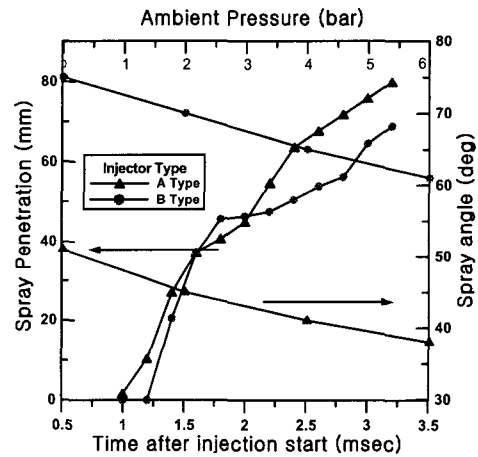


Fig. 4 Comparison of penetrations and spray angles according to ambient pressure

3.2 흡입 차압 변화에 따른 분무 특성

Fig. 1에서 보인 바와 같은 흡입 행정 분사를 모사한 정상유동 가시화 시스템을 이용하여 A와 B 인젝터에 대한 분무 거동 특성을 파악하였다. 연료 분사압은 100bar로 고정하였고, 흡입 차압은 260~380mmAq으로 설정하였으며 40mmAq 간격으로 차압을 유지하였다. 또한 오리피스를 이용하여 일정 유량을 공급하였다. 또한 시간 변화에 따른 화상 취득은 ICCD 카메라를 이용하여 같은 조건에서 5화상의 이미지를 평균을 낸 결과이다.

두 인젝터에 대한 시간 경과에 따른 연료 거동

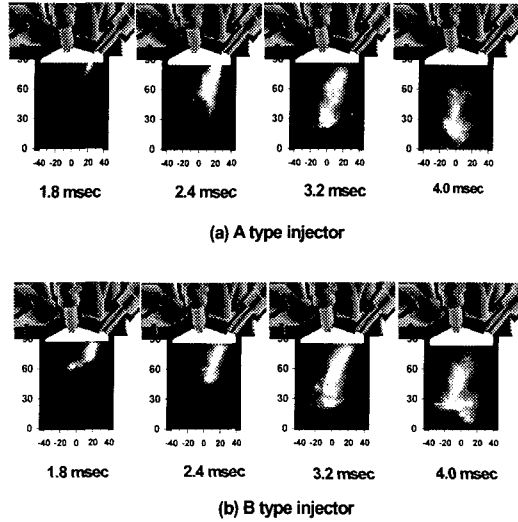


Fig. 5 Visualization of steady-flow to time after injection start

과 흡입 차압 변화에 따른 연료 거동을 가시화한 결과를 Fig. 5, 6에 나타내었다. Fig. 5는 밸브 리프트를 8mm로 고정하였으며, 100bar로 고압 분사했을 때의 가시화 결과로서 A 인젝터의 경우, 분사 시작후 시간이 경과함에 따라 분무 액적들은 실린더 중앙에 분포함을 알 수 있었다. 그 이유는 인젝터 A는 약 20°의 offset각을 가지고 있기 때문이며, 흡기 포트에 유입되는 텀블 유동에 잘 수반되었기 때문이라 사료된다. 그러나 B 인젝터의 경우는 실린더 중심면의 좌측으로 분무 액적들이 분포함을 알 수 있는데 이것은 벽류 현상(wall-wetting)을 수반될 가능성이 있다고 사료된다.

Fig. 6은 인젝터가 분사 시작후 4msec일 때, 밸브 리프트가 8mm일 경우의 흡입 차압(suction differential pressure)의 변화에 따른 흡입 행정 분사를 모사한 정상 유동 가시화 결과이다. A 인젝터의 경우, 흡입 차압이 증가함에 따라 분무 액적 분포의 중심이 중앙면으로 이동하는 것을 볼 수 있었으며, 흡입 차압이 증가함에 따라 흡입 유량의 증가로 인하여 분무 액적이 증발되어 산란되는 연료의 분포가 감소된 것으로 사료된다. 또한, 흡입 차압이 증가함에 따라 인젝터 B의 경우 실린더 벽면쪽에서 중앙면쪽으로 혼합기 분포가 이동하는 것을 관찰할 수 있었다.

A와 B의 인젝터를 비교해 보면, A 인젝터와

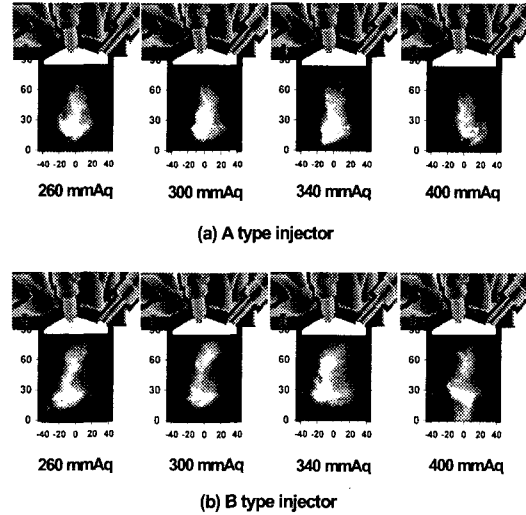


Fig. 6 Visualization of steady-flow according to change suction differential pressure

같이 실린더 중앙면에 액적이 분포하는 현상은 인젝터 offset 각의 영향과 분사된 연료가 밸브 리프트를 통해 유입되는 텀블 유동장에 수반되었기 때문이라 사료된다. 반면 인젝터 B의 경우 전체적으로 실린더 라이너 벽면에 벽류를 형성할 가능성이 많은 것으로 판단된다. 벽류 발생을 감소시키기 위해서는 인젝터의 부착 위치를 조절하게 되면 벽류 발생 저감 효과를 얻을 수 있다고 생각된다.

3.3 밸브 리프트 변화에 따른 분무 특성

Fig. 7은 분사 압력을 100bar로 고정하고, 분사 시작후 4msec일 때의 밸브 리프트 변화에 따라 일정 차압법을 이용하여 인젝터와 흡입 유동에 대한 유동 가시화 결과이다.

일반적으로 흡입 차압이 증가와 밸브 리프트가 증가함에 따라 텀블비가 커지는 경향을 나타내며, 이러한 연구 결과를 토대로 Fig. 7의 가시화 결과, Fig. 7(a)는 밸브 리프트가 큰 10mm인 경우에 분무 도달거리가 길어짐을 확인할 수 있었다. 또한, 20°offset각을 가진 인젝터는 밸브 리프트에 관계없이 연료 액적의 분포가 텀블 유동에 잘 수반되어 실린더 중앙면 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7(b)는 배기 밸브 출구 부근에 분무 액적들이 실린더 좌측면에 분포함을 확인하였다. 또한 밸브 리프트가 증가함에 따라 액적 분포의

중심이 우측으로 이동함을 보였으며, 그것은 텀블 유동장에 의해 액적 분포가 이동되었다고 사료된다. 저 밸브 리프트일 때 좁은 밸브 리프트를 통하여 유입되는 빠른 흡입 유동에 의해 실린더 벽면에 벽류가 생성되는 원인이 될 수 있다고 생각된다. 또한 전체적인 결과를 통해 밸브 리프트가 증가함에 따라 분무 형상이 유동 방향으로

회어짐을 확인할 수 있으며, 4mm인 경우보다는 10mm일 때 텀블 유동에 더욱 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

3.4 흡입행정 분사시의 벽류 특성

Fig. 1에서 보인 바와 같은 흡입 행정 분사를 모사한 정상유동 슈리렌 가시화 시스템을 이용하여 A와 B 인젝터에 대한 분무 거동을 파악하였다. 인젝터는 연소실 측면에 부착시켰으며, 분사 압은 100bar로 고정하였고, 흡입 차압은 340mmAq로 유지하였으며 오리피스를 이용하여 일정유량을 공급하였다. 밸브 리프트 변화와 분사 시간 경과에 따른 연료 거동을 슈리렌 방법을 이용하여 가시화한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8(a)와 (b)는 분사 시작후 시간 경과에 따라 연료 분포는 실린더 중앙면에 분포함을 확인하였다. 이러한 현상은 Fig. 5에서 본 결과와 일치함을 알 수 있었으며, 연료 분포가 확산되어 보이는 결과는 연료의 증발에 의한 기상 상태의 액적들로 판단된다. 또한 밸브 리프트가 8mm일 때 4mm인 경우보다 분무 도달거리가 증가함을 확인하였다. Fig. 8(c)와 (d)는 분무 시간 경과에 따라 분무 액적들은 텀블 유동장에 수반되어 실린더 라이너 벽면으로 이동함을 확인하였다. 분사후 5msec일 때 연료 액적들이 실린더 벽면에

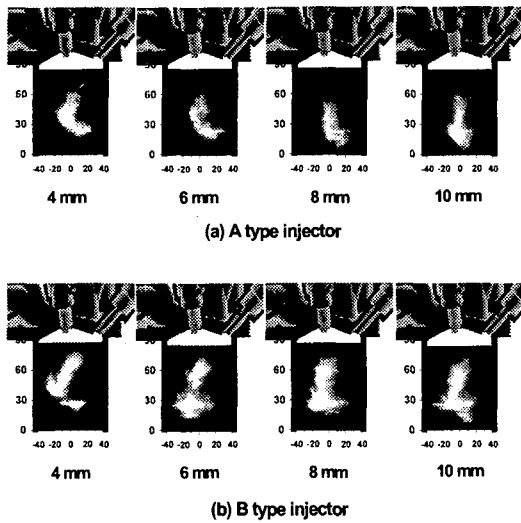


Fig. 7 Visualization of steady-flow according to change valve lift

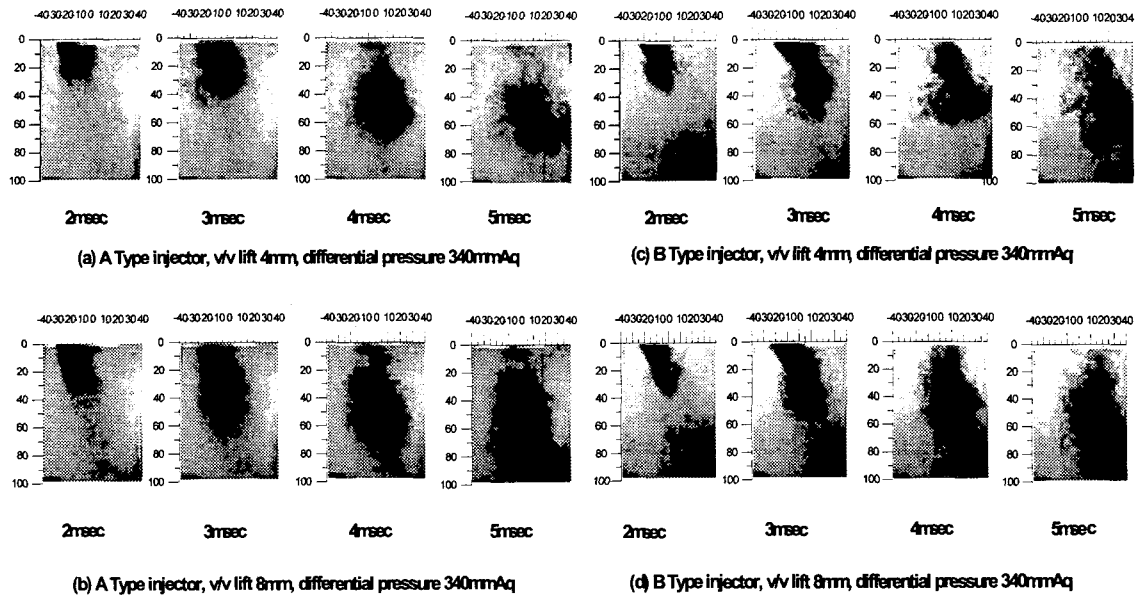


Fig. 8 Visualization of steady-flow to change valve lift

부착되어 벽류를 형성하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8(a)와 (c)의 결과로부터 벽류 현상을 감소시키기 위하여는 인젝터의 분무 형상에 offset 각을 설치하거나, 인젝터의 부착 각도를 변경하는 것이 실린더 라이너 벽에 부착되는 벽류 발생을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

3.5 흡입행정 분사시의 기상의 혼합기 분포 특성 파악

Fig. 1에서 보인 바와 같은 흡입 행정 분사를 모사한 가시화 실험장치를 통해 레이저 산란 기법(Mie-scattering method)와 솔리렌 방법을 이용하여 흡입 행정시의 기상의 분포를 측정하였다.⁽⁹⁾ 본 실험에 사용된 인젝터는 B 인젝터이며, 분사압은 100bar로 고정하였다. 또한 흡입 차압은 340mmAq로 고정하였을때의 분사 시작후 시간변화에 따른 기상의 분포를 나타낸 결과이다.

Fig. 9로부터 분사 시작후 시간 경과에 따른 액상의 분포는 점차적으로 감소하는 현상을 관찰할 수 있었으며, 이화는 상반된 결과로 분사후 시간이 경과함에 따라 기상의 분포는 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 이유는 고압으로 분사된 액적들이 흡입 공기에 의해 기화가 촉진된 결과로 사료된다. 실제 엔진에 적용할 경우, 실린더내의 온도가 상온에서 실험한 상태보다 높기 때문

에 액상의 경우 빠른 기화 현상으로 인하여 실린더내의 기액상 분포는 시간변화에 따라 빠르게 액상에서 기상으로 상변화를 할 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 레이저 산란 기법과 솔리렌 방법을 이용하여 흡입 행정시를 모사한 분무 거동 특성 및 기상의 분포를 파악하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 분무 특성 비교결과를 통해, 분무각이 작은 인젝터가 상대적으로 공기와 접촉 저항이 작아지므로 분무 도달거리가 상대적으로 크다고 사료된다.

(2) 흡입 행정 분사시 흡입 차압 변화에 따른 분무 특성을 가시화한 결과, A의 인젝터의 경우 offset 각을 가지고 있기 때문에 실린더 중앙에 연료가 분포하는 경향을 보이고 있다.

(3) 흡입 행정 분사시 밸브 리프트 변화에 따른 분무 특성을 가시화한 결과, 밸브 리프트가 증가함에 따라 분무 형상이 유동 방향으로 휘어짐을 확인할 수 있으며, 4mm인 경우보다는 10mm일 때 텀블 유동에 더욱 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

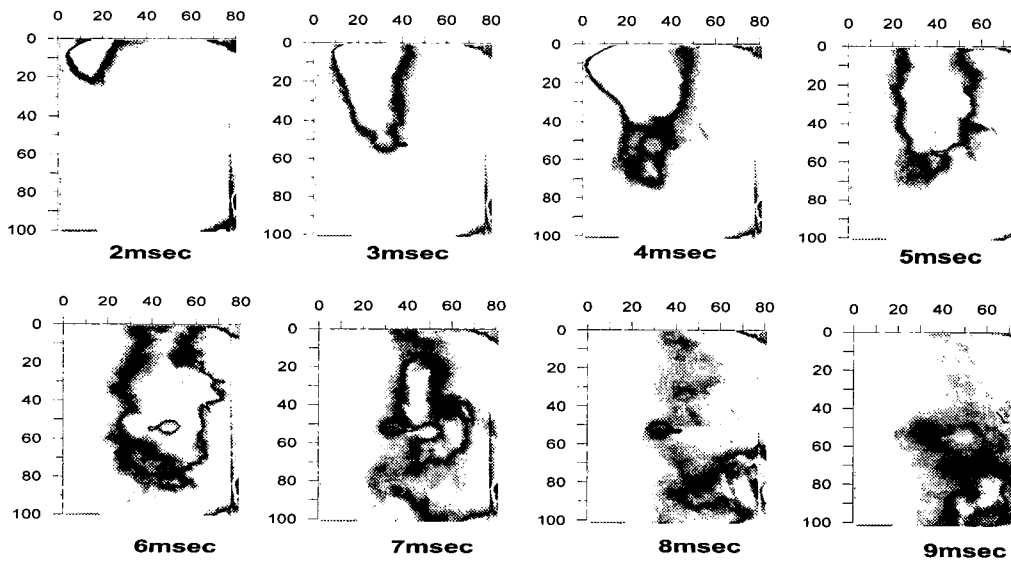


Fig. 9 Visualization on vapor phase according to time after injection start

(4) 흡입 행정 분사시 슈리렌 방법을 이용한 분무 특성을 가시화한 결과, 벽류 현상을 감소시키기 위하여는 인젝터의 분무 형상에 offset 각을 설치하거나 인젝터 부착각도를 최적화시킴으로써 부착 현상을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

(5) 흡입 행정 분사시의 기상의 분무 특성을 가시화한 결과, 분사 시작후 시간경과에따라 분사 초기에는 액상의 분포가 지배적이지만, 분사 후기에서는 기상의 분포가 지배적임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 G7 차세대자동차 기술 사업의 연구비에 의해 수행된 연구결과로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Michael H. Shelby, Brad A. VanDerWege and Simeone Hochgreb, 1998, "Early Spray Development in Gasoline Direct-Injected Spark Ignition Engines," SAE980160.
- (2) Fu-Quan Zhao, Ming-Chia Lai., 1997, "A Review Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignition Direct-Injection Gasoline Engines," SAE970627.
- (3) Iwamoto. Y, Noma. K, 1997, "Development of Gasoline Direct Injection Engine," SAE970541
- (4) Lake, T.H., Stokes. J, Whitaker. P.A, Crump, J.V, 1998, "Comparison of Direct Injection Gasoline Combustion System," SAE980154.
- (5) Yasunori Iwakiri, Akihiko Kakuko, 1999, "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
- (6) N S Jackson, J Stokes, 1997, "Research and Development of Advanced Direct Injection Gasoline Engines," *18th International Vienna Motor Symposium*.
- (7) Toshharu Nogi, Takashi Shiraiishi, 1998, "Stability Improvement of Direct Fuel Injection Engine under Lean Combustion Operation," SAE982703.
- (8) Fu-Quan Zhao, Joon-Ho Yoo, 1996, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engine," SAE961925.
- (9) Wolfgang Ipp, Volker Wangner, 1999, "Spray Formation of High Pressure Swirl Gasoline Injectors Investigated by Two-Dimensional Mie and LIEF Techniques," SAE1999-01-0498.