

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0061

정적챔버내의 고압 가솔린 인젝터의 연료분무구조

The Fuel Spray Structure of a High Pressure Gasoline Injector in a Constant Volume Chamber

권의용*, 조남효*
Eui-Yong Kwon, Nam-Hyo Cho

ABSTRACT

This work presents an investigation of aerodynamic characteristics of fuel spray injected from a high pressure hollow cone swirl injector into a constant volume chamber. Laser tomography visualization was used to interrogate the fuel and air mixing characteristics and the effect of chamber pressure and temperature increase was analyzed. Preliminary results on spray development showed that mixing effect tends to increase with the increase of injection pressure and chamber gas pressure yielding a decrease of spray penetration and an attenuation of well-defined vortex structure. Topological analysis of the spray structure has been performed to initiate the understanding of mixing and vaporization process. For the present experimental conditions, fuel injection pressure and chamber gas pressure appear as the dominant factors, which govern the transient mixing characteristics. Moreover, spray atomization characteristics are improved by increasing chamber gas temperature.

주요기술용어 : Tomography Laser (토모그래피 레이저), High Pressure Gasoline Injector (고압가솔린 인젝터), Constant Volume Chamber (정적챔버), Spray Topology (분무 토폴로지), Vortex (와류), Entrainment (유입), Penetration Length (분무침투 길이), Spray Width (분무폭)

1. 서론

최근 활발하게 개발되고 있는 직접분사식 가솔린 엔진의 연소시스템의 개발에 있어서의 주된 관점은 최적의 연료 분무연소를 이루게 하는 설계인자의 선정에 있으며, 이를 위해서는 액체 연료의 기화과정과 공기와의 혼합과정이 짧은 시간에 균일하게 이루어지게 하여 연소가 효율적으로 일어날 수 있도록 하는데 있다.¹⁾ 따라서 엔진 연소실 내부의 유동 및 열조건에 따라 고압 인젝터로부터 분사되는 연료와

연소실내의 공기유동과의 혼합특성에 대한 상세한 정보가 필요하다. 또한 직접분사식 가솔린 엔진의 성층연소시 피스톤 캐비티 표면에서의 연료액적 충돌로부터 벽류 현상과 불완전연소에 의해 수트 발생 가능성이 농후하므로 수트 생성을 최소화 하고 효율적인 분무연소를 위해 분무침투 길이 및 분무폭 그리고 기화과정에 대한 정보가 더욱 요구된다. 이러한 현상을 이해하고자 정적챔버를 이용하여 실제 엔진조건과 유사한 챔버내 가스환경을 만들어 가솔린 연료 분사기의 분무특성을 분석하는 연구가 진행 되고 있다. 이러한 연구사례는 다음과 같다.

* 회원, 고등기술연구원

Zhao 등²⁴⁾은 그들의 연속된 논문에서, 평면 Mie 산란법과 위상도플러법(Phase Doppler Method, PDPA) 레이저 계측기를 사용하여 GDI 인젝터의 챔버내 환경변화에 따른 분무특성이 매우 상이해짐을 보여주고 있다. 대표적인 결과로서 주변가스의 압력 상승이 분무침투 길이와 분무폭(i.e. 분무각)의 감소를 가져옴과 동시에 분무형상이 상대적으로 비대칭 해지고 불균일 해짐을 보여주었다. 이외에도 Kume 등²⁵⁾은 다양한 주변 압력 조건에서 분무의 발달과정을 가시화 하였는데 낮은 챔버 압력에서 분무형상이 넓게 퍼진 원추형으로 발달하고 챔버압력이 증가함에 따라 분무침투 길이가 감소하며 조밀하고 속이 찬 원추형 구조로 발달한다고 보고하고 있다. Lpp 등²⁶⁾은 Mie 산란법과 레이저 유도 형광법(Laser Induced Exciplex Fluorescence, LIEF)을 사용하여 액체 상태와 기화 상태의 분무발달 과정을 분석할 수 있는 시스템을 보여주고 있으며, 이러한 시험결과로서 주변 가스의 온도상승이 미립화를 촉진시키고 분무 구조가 밀도에 큰 영향이 있는 것을 보여 주었다.

본 연구에서는 정적챔버내의 다양한 조건에서 중공형 노즐에서 분사되는 액체 연료의 분무특성을 분석하였다. 이를 위해 최근에 양산되기 시작한 닛산 4기통 1.8l 직접분사식 가솔린 엔진(QD18DD)에 사용되는 양산 인젝터를 사용하였으며 인젝터 분사 압력과 정적챔버내의 공기공급압력 및 온도를 변화시켜 주었다. 본 연구의 목적은 이러한 외부 인자들의 영향을 분석함으로써 분무 혼합특성을 이해하는 것과 전산유체 해석 상에서 분무 모델을 검증하기 위한 기초 실험 데이터로 활용하는 것이다.

2. 실험 장치 및 조건

2.1 실험 장치

Fig.1은 인젝터의 분무 발달과정을 가시화 하기 위하여 사용된 실험장치를 나타낸다. 사용된 인젝터는 50~100bar의 연료압력에서

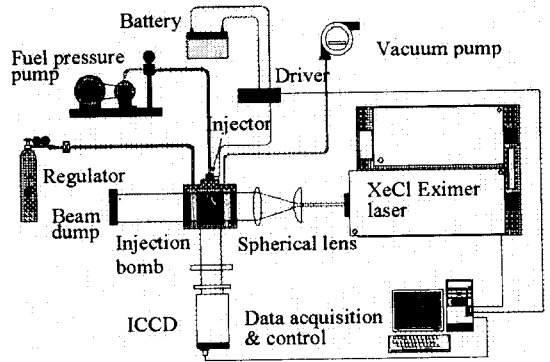


Fig.1 Schematic diagram of the tomography system

연료분무각이 52° 정도 되고, 중공형 스월 유동으로 분사토록 설계된 인젝터이다. 가압 시스템은 연료 공급 펌프, 고압 펌프, 압력 레귤레이터로 구성되었다. 연료로는 순수 아이소옥탄(iso-octane)을 사용하였으며 질소를 이용하여 정적챔버를 압축함으로써 챔버내의 압력을 조절하였다. 정적챔버는 10mm 두께의 퀴츠실린더로 제작되었으며 직경과 높이는 각각 100mm, 110mm 이었다. 정적 체적실에는 다수의 열봉(heating tube)을 설치하여 내부 온도를 최대 650K 까지 증가할 수 있도록 하였다. 광원으로는 308nm의 XeCl 엑시머 레이저(Lambda Physik Compex 205)를 이용하여 280mJ의 최고 펄스에너지 사용하였다. 레이저광은 실린더형 렌즈(f=150mm)와 슬릿을 통해 높이 65mm와 두께 0.5mm의 평면광을 발생한다. 화상 촬영은 ICCD 카메라(해상도 576×384, La Vision & Princeton Instruments)를 이용하였으며 분사시간과 레이저 발진 및 카메라 촬영 시간은 동기시스템 Princeton Instruments PG-200과 카메라 조정장치 Princeton Instruments ST-138, 4채널 지연/펄스 발생기 Stanford Research Systems DG535 등을 사용하여 동기시켰다.

자유분무 상태에서 인젝터 성능을 평가하는 단계에서는 토모그래피 가시화와 위상차 도플러법(Phase Doppler Method, PDPA)에 의한 유속측정, 그리고 영상처리에 의한 입자 계측방법(Particle Motion Analysis System, PMAS, V-TEK 사)을 사용하였다.

비록 PDPA 기법이 분무 특성(e.g. 액적 크기, 속도, 질량유속) 분석에 널리 사용되고 있지만 일반적으로 가시화에 비해 장치설정이 복잡하고 시간이 많이 걸리므로 정적채적실내 환경변화에 대한 분무 구조의 특성을 알아보기 위한 기초 실험으로는 토모그래피 가시화가 매우 효율적일 것이다.

2.2 실험 조건

정적챔버내의 유동장 변화가 분무 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 Table 1에 나타난 것과 같이 분사압력과 주변 압력 및 온도 등의 조건에서 분사 시점부터 시간별 촬영하였다. 분사시점은 인젝터 시스템과 공압지연(pneumatic delay)에 의한 분무지연 시간(0.35ms)을 감안하여 설정하였으며 이후에 나타나는 시각은 분무지연 시간을 보정한 값들이다. 전 구간에서 분사시간은 2ms로 고정하였으며 Table 1의 밑줄 친 값들은 실제 시험코자 하는 엔진에서 연료분사가 약 BTDC 50°에서 일어날 때의 조건과 유사하다.

Fig.2는 본 실험에서 분무특성을 분석 하는데 사용한 변수들의 정의이다. 모든 실험 조건에서 비교적 일정한 Mie 산란신호를 나타내는 $x=70\text{mm}$ 지점의 신호를 기준값으로 하여 측정위치에서의 신호 강도가 기준신호의 약 96%되는 지점을 고려하였다. 그림에서 보는 바와 같이 인젝터 축방향에서의 거리와 횡방향에서의 거리를 각각 분무침투 길이(penetration length)와 분무폭(spray width)으로 정의하였다.

Table 1 Experimental conditions

Injection pressure, p_{inj}	30, 50, <u>70</u> bar
Chamber pressure, p_{ch}	1, 3, <u>6</u> bar
Chamber temperature, T_{ch}	293, 323, 373, <u>423</u> K

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 자유분무에서의 인젝터 특성

Fig.3는 시간별로 Mie 산란신호를 통해서 가시화한 분무 형상을 대칭면 (Fig.3a)과

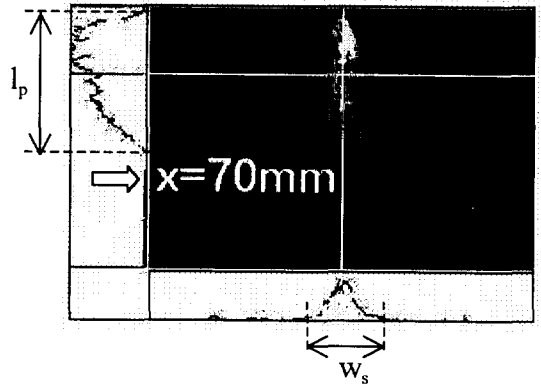


Fig.2 Definition of spray parameters: penetration length (l_p) and spray width (w_s)

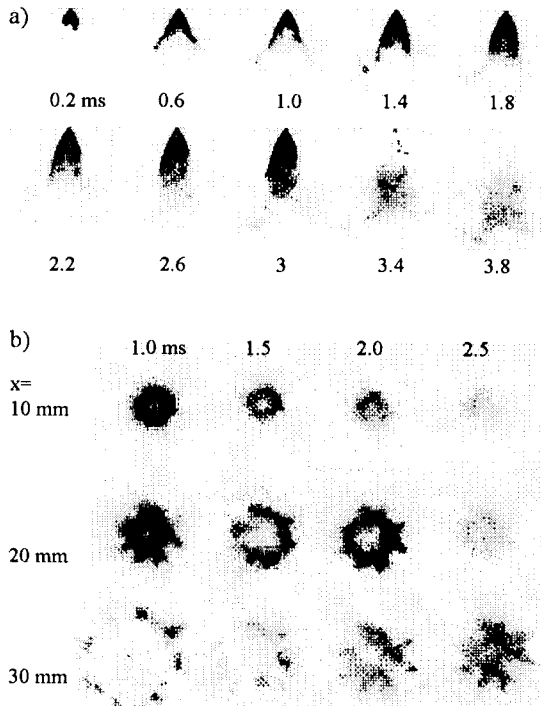


Fig.3 Sequential spray images of swirl injector in free jet condition: $p_{inj}=70\text{bar}$, $t_{inj}=3\text{ms}$, (a) side view on the symmetric plane and (b) cross-section view

횡방향(노즐 출구로부터 $x=10, 20, 30\text{mm}$, Fig.3b)에서 보여준다. 분무 하단부에서는 분무 주류 혹은 액적과 공기 혼합영역의 외부표면에서의 높은 속도차에 의한 운동량

및 에너지 교환으로부터 역순환와류(counter-rotating vortex)가 형성되며 분사시간이 끝난 이후에도 존재한다.(Fig.3a) 시간이 지나면서 와류 영역(vortex periphery)이 점차 증가하는 것으로 보아 유입효과(entrainment effect)가 분사 말기에 중요하게 나타남을 짐작할 수 있다.

횡방향 가시화사진(Fig.3b)을 통해 분사초기($t=1\text{ms}$) 그리고 분무선단($x=10\text{mm}$)에서 분무 형상이 비교적 균일하고 대칭임을 볼 수 있다. 결국 균일한 액적분포의 중공형 구조로부터 강한 유입현상과 충분한 회전운동량이 인젝터 스웰팁에 의해 발생함을 알 수 있다. 이와 같은 유입효과와 스웰의 영향은 분무하류로 갈수록 당연히 약화되어 불균일한 구조로 발전한다. 동일한 위치에서 시간별 분무특성을 보면, 시간이 경과할수록 공기와 연료의 혼합이 촉진되어 분무구조가 중공형에서 원추형으로 발달함을 알 수 있다. 분사된 연료는 분무 하류로 갈수록 액적링(fuel ring)을 형성하며 그 두께가 점차 증가하는 방향으로 발전한다. 중공형 구조에서 원추형 구조로 진전되는 현상과 같은 위치에서 액적관 직경이 비교적 동일하게 유지되는 현상으로부터 미립화 및 공기와의 혼합이 외부에서 활발히 이루어지고 원추내부로 발전됨을 예측할 수 있다.

앞에서 설명한 분무특성은 Fig.4에 표시된 유동 토폴로지 구조로부터도 쉽게 이해할 수 있다. 일반적으로 중공형 분무는 분무거동에 의해 외부공기의 역순환이 일어나고 액적과 혼합하는 유입영역(I)과 분무 주류로 둘러 쌓인 원추영역(II)으로 구분될 수 있는데 그림은 각 영역의 형성 메카니즘을 설명해 준다. 노달점(nodal point)인 와류중심(vortex core)은 박리표면(separation surface)으로 표기될 수 있는 분무주류 표면에서 발생한다. 토폴로지 관점에서 이와 같은 거동이 성립되기 위해서는 반드시 박리표면에서 새들점(saddle point)이 존재하여서 두 특이점(singular point)이 서로 연결되어 있어야 한다. 이와 같은 해석방법으로부터 외부 공기의 유입이 이례적으로 알려진 분무

선단에서 뿐 아니라 와류 아래에서도 일어남을 예측할 수 있다. 이같은 유입현상은 혼합과정과 미립화과정 모두에 중요한 영향을 미칠것으로 판단된다. 토폴로지에 대한 전반적인 설명은 Hunt 등⁷⁾에서 찾아볼 수 있다.

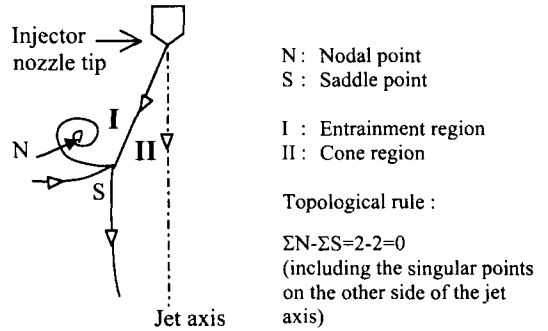


Fig.4 Topological structure of the spray

Fig.5는 두 분사 압력($p_{inj}=50, 70\text{bar}$)에서 PDPA로 측정된 유속벡터장을 가시화한 분무현상과 비교한 것이다. 두 경우 모두 분무선단에서 하류로 갈수록 분무주류의 최고속도는 감소하면서 공기와 액적의 혼합이 촉진되어 속도분포가 균일해 짐을 보여준다. 일반적으로 분사압력의 증가는 강한 유입속도를 유발하고 유입되는 위치가 노즐출구쪽으로 접근하므로써 혼합과정이 더욱 빨리 이루어진다.

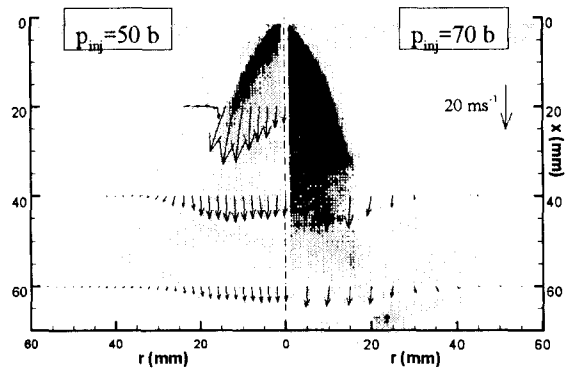


Fig.5 Velocity vector field and spray images on the symmetric plane at two injection pressures

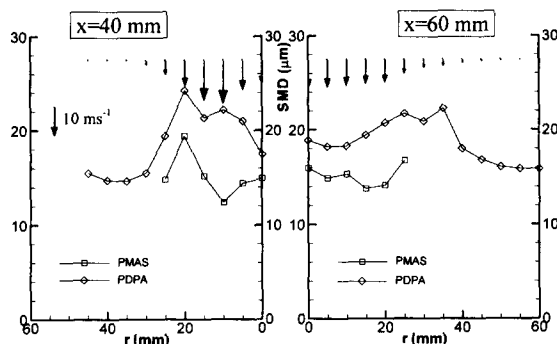


Fig.6 Velocity vectors and SMD distribution at two positions from the nozzle tip

Fig.6는 횡방향으로 측정된 SMD(Sauter Mean Diameter) 분포를 나타낸다. 이를 위해 두 가지 실험장치(PDPA, PMAS)를 사용한 결과를 비교하였으며 절대값은 다르나 서로 비슷한 경향성을 보인다. SMD는 분무 중심축에서 바깥 방향으로 점차 증가하며 $r=20\text{mm}$ 에서 최대치를 나타내고 그 이상에서는 급격히 감소한다. 이와 같은 분포 경향은 작은 액적들은 주변 공기유동의 영향을 크게 받는 반면에 큰 액적들은 상대적으로 큰 관성으로 인해 궤적을 유지하면서 중공형 구조를 형성하기 때문이다.²⁾ 상대적으로 속도구배가 큰 분무의 외부 혼합영역에서 최고 SMD가 나타나는데 이는 이 구간에서의 강한 전단유동과 거대 난류구조의 간섭에 의한 것으로 판단된다.⁸⁾ 이와 같은 현상은 완전발달 구간이라고 생각되는 $x=60\text{mm}$ 에서도 뚜렷이 나타난다. 두 장비의 결과에서 생기는 측정 오차는 최고 45%이다. 이것은 검사체적(probe volume)이 PMAS(약 $1.2 \times 1.2 \times 1\text{mm}^3$)보다 상대적으로 작은 PDPA의 경우(약 $0.2 \times 0.2 \times 0.4\text{mm}^3$), 전방 산란 모드로 작동함에 따라 Mie 신호가 큰 액적쪽으로 편향되기 때문이다.⁹⁾ 또한 PMAS는 검사체적이 PDPA에 비해 약 6배 크므로 인해 크고 작은 액적이 화상에 잡힐 확률이 커져 공간해상도가 상대적으로 낮기 때문일 것으로 판단된다.

3.2 챔버내부 환경 변화에 대한 분무 특성

Fig.7는 세 가지 분사압력에 대한 분무 침투길이 l_p 와 분무폭 w_s 의 변화를 나타낸다. 앞서 언급된 바와 같이 본 결과분석에서의 l_p 와 w_s 는 Mie 산란신호가 각각 축방향과 횡방향 분포에서 급격히 감소하는 위치(c.f. Fig.2)를 기준으로 구한 거리이다. 초기 $p_{inj}=30\text{bar}$ 의 경우는 분무혼합이 원활하지 않게 나타나며 50bar 이상에서 원추형영역이 균일하게 혼합되는 분무형상을 보인다. Yoo 등³⁾의 결과와는 반대로 높은 분사압력(e.g. $p_{inj} \geq 50\text{bar}$)에서 분무주류 표면에서의 역순환 와류가 형성된다. 분사압력이 높을 수록 l_p 와 w_s 는 증가하며 분사 말기에 가장 큰 차이를 보인다. 실제 엔진 운전조건에서는 70bar의 분사압력이 주로 사용되었다.

Fig.8과 Fig.9은 챔버 내부 압력변화에 따른 분무 특성을 나타낸 것이다. 가시화 사진을 보면 챔버압력이 증가함에 따라 초기연료 분무각이 작아지고 분무의 좌우대칭성과 중공형 분무구조가 둔화되는 것을 알 수 있다.¹⁰⁾ 시간별 분무침투길이의 변화를 살펴 보면 높은 챔버압력에 대해 분사초기부터 $t=1.5\text{ms}$ 까지는 l_p 가 감소하다가 그 이후에는 반전되는 경향을 보인다(i.e. $p_{ch}=3, 6\text{bar}$). 이것은 인젝터 선회류에 의한 원심력이 시간에 따라 점차

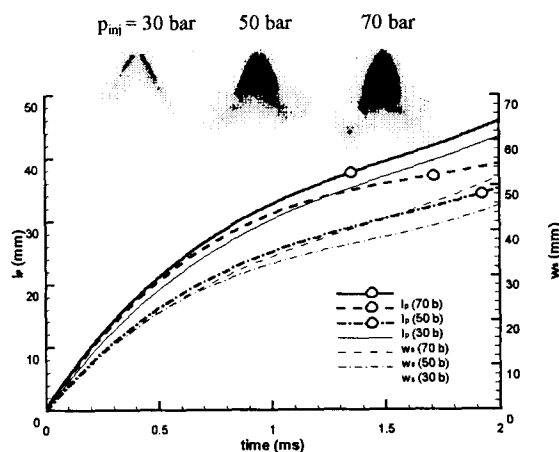


Fig.7 Characteristics of spray development for various injection pressures: $t_{inj}=2\text{ms}$, $p_{ch}=1\text{bar}$, spray images taken at 2ms after start of injection

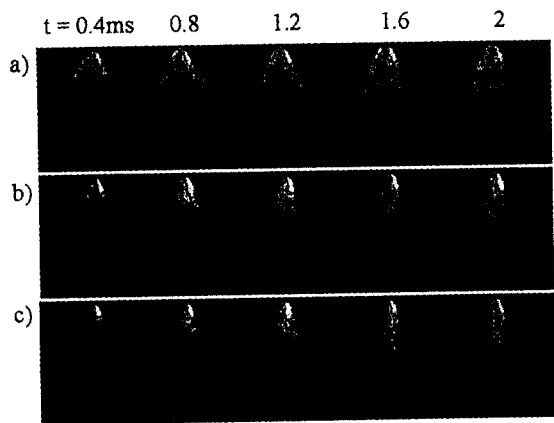


Fig.8 Spray behavior for various chamber pressures: $t_{inj}=2ms$, $p_{inj}=70bar$, $T_{ch}=293K$, (a) $p_{ch}=1bar$, (b) $p_{ch}=3bar$, (c) $p_{ch}=6bar$

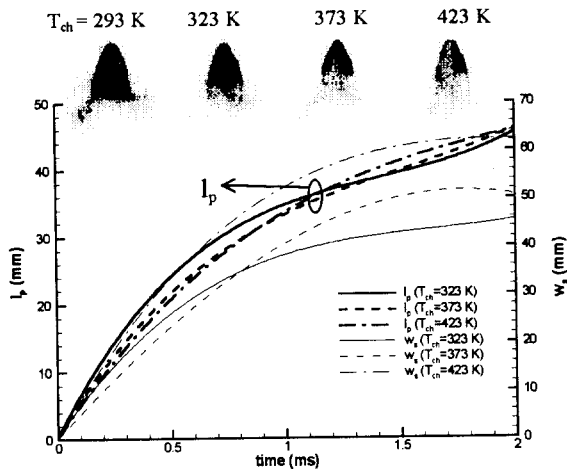


Fig.10 Characteristics of spray development for various chamber temperatures: $t_{inj}=2ms$, $p_{inj}=70bar$, spray images taken at 2ms after start of injection

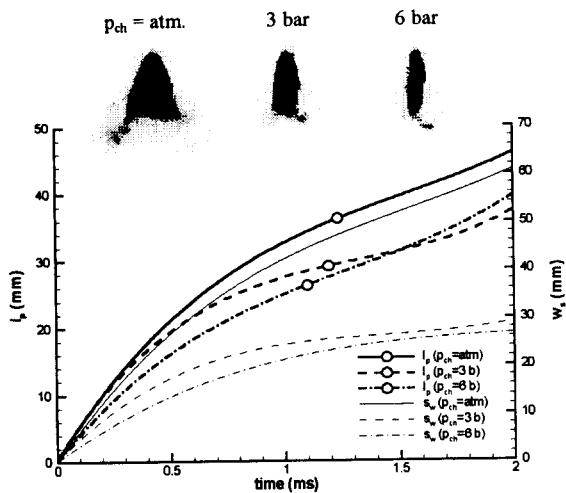


Fig.9 Characteristics of spray development for various chamber pressures: $t_{inj}=2ms$, $p_{inj}=70bar$, spray images taken at 2ms after start of injection

작아지면서 주변가스의 압력상승으로 인해 분사압력과의 팽창비(expansion ratio= p_{inj}/p_{ch})가 작아지면서 원추 중심으로 유입효과가 감소함을 의미한다. 결국 유입효과의 감소로부터 분사말기에서의 미립화과정이 $p_{ch}=3bar$ 보다 $6bar$ 에서 지연되면서 원추중심에 액체상태의 연료가 많이 존재함을 예상할 수 있다. 두 압력 조건에서 분무폭 차이가 작아지는 것과 가시화 사진을 통해 역순환

와류의 크기와 와류중심이 하류로 발전하는 경향은 이와 같은 현상을 뒷받침 해 준다.

Fig.10은 챔버온도 변화에 따른 시간별 분무 특성을 나타낸 것이다. 측정된 온도 범위에서는 예상과는 다르게 미립화 정도에 대한 I_p 의 영향이 크지 않게 나타났다. 반면에 w_s 은 챔버온도가 상승할수록 증가하는 경향을 보이고 분사 후 약 1.5ms 후부터는 완만하게 변하는 것을 볼 수 있다. 가시화 사진으로부터 중공형 구조가 계속적으로 유지되고 챔버온도가 상승할수록 역순환 와류동이 둔화되고 미립화가 향상됨을 알 수 있다. 또한 챔버압력 상승시의 결과와는 다르게 분무각의 변화는 매우 작게 나타나고 미립화 과정이 분무하류에서 분무주류로 둘러싸인 원추 영역으로 발전하는 것을 알 수 있다.

Fig.11는 챔버내 가스밀도 변화에 대한 분무 특성을 나타낸다. 밀도의 증가는 액적에 작용하는 항력의 증가를 가져오므로 액적의 속도가 상대적으로 감소한다.¹¹⁾ 이것은 곧 높은 챔버내 가스밀도에서는 연료분무 내부로의 외부가스 유입이 촉진됨을 의미하고 결국은 미립화 과정의 향상을 통해 I_p 와 w_s 가 감소하는 경향을 보인다.

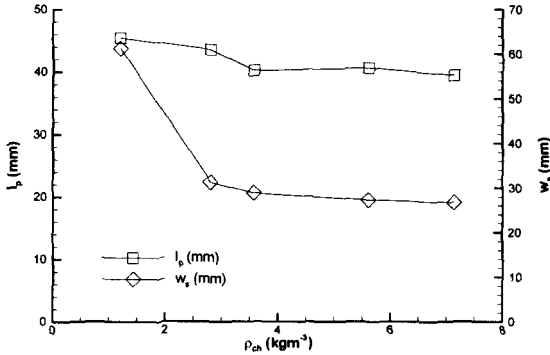


Fig. 11 Characteristics of spray development for various chamber gas densities: $t_{inj}=2ms$, $p_{inj}=70bar$

Fig. 12은 분사시간에 대한 영향을 나타낸 것으로 분사압력 70bar에서 세 가지 분사시간($t_{inj}=1, 2, 3ms$)에 대한 결과를 보여 주고 있다. 분사초기부터 분사가 끝난 이후까지 전 구간에서 분무형상은 거의 동일하며 l_p 와 w_s 에 대한 영향도 매우 작게 나타나는데, 이는 분사시간에 따른 분무 운동량의 변화율이 그다지 크지 않음을 의미한다.

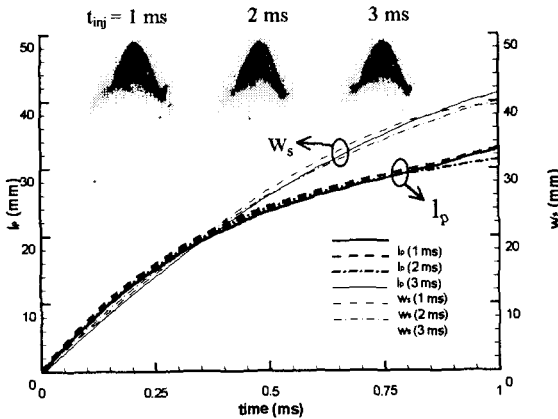


Fig. 12 Characteristics of spray development for various injection durations: $p_{inj}=70bar$, $p_{ch}=1bar$, $T_{ch}=293K$, spray images taken at 2ms after start of injection

Fig. 13은 분무주류주변의 외부가스 조건에 대한 분무 토폴로지를 나타낸다. 각각의 그림에서, 우측의 사진은 분무거동특성이

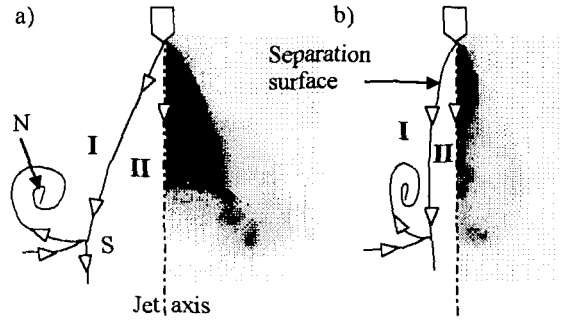


Fig. 13 Comparison of the spray topology for two surrounding gas conditions: $p_{inj}=70bar$, $t_{inj}=2ms$, (a) free jet into the atmosphere at rest and (b) into the chamber where $p_{ch}=6 bar$ and $T_{ch}=373K$

비교적 선명하게 나타나는 분무말기 ($t=2ms$)에 가시화한 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 토폴로지 측면에서 큰 변화는 일어나지 않고 다만, 박리표면이 인젝터축 방향으로 이동하는 것과 와류영역이 좁혀지는 현상을 볼 수 있다. 결국 분무각이 작아지면서 혼합영역(II)이 축소되는 현상은 외부가스의 유입(I)을 둔화시키는 요인으로 작용할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 중공형 스윙분무 형상을 가진 고압 직접분사식 가솔린 엔진용 인젝터의 분무 거동 및 혼합특성에 영향을 주는 다양한 변수들에 대해 고찰하였으며 ($30 \leq p_{inj} \leq 70 bar$, $1 \leq p_{ch} \leq 6 bar$, $293 \leq T_{ch} \leq 423 K$) 그 영향은 다음과 같이 요약 할 수 있다.

- 1) 자유분무에서 중공형 구조는 분무표면에서 발생하는 역순환와류와 인젝터 선회류에 의해 가스와 연료의 혼합이 분무 외부에서 상대적으로 활발히 이뤄지며 분무 하류로 갈수록, 또한 시간에 따라 점차 미립화 과정이 분무 내부로 진행되면서 원추구조의 강한 혼합영역으로 발전한다.
- 2) 챔버내에서 가스와 연료와의 혼합 과정은 챔버압력 및 연료분사압력을

- 증가시킬때 모두 원활히 나타나며 액적의 미립화 과정은 챔버압력과 온도를 증가시키는 경우에 촉진된다.
- 3) 챔버내에서 가스밀도의 증가는 가스와 연료와의 혼합과 액적의 미립화를 향상시켜 분무침투 길이와 분무폭이 상대적으로 작아진다.
 - 4) 본 연구에서 수행된 자유분무 및 챔버내 가스의 온도와 압력 조건에서, 분무 토포로지 분석으로부터 외부 가스의 유입에 따른 혼합 과정이 분무주류의 외부 혼합영역 뿐 아니라 역순환와류 하단에서도 이루어짐을 알 수 있다. 이는 분무의 미립화 과정이 와류하단에서 인젝터 축 주위의 혼합 영역으로도 발전함을 의미한다.

참고 문헌

- 1) M. Pontoppidan, G. Gaviani, G. Bella, and V. Rocco, "Improvements of GDI-Injector Optimization Tools for Enhanced SI-Engine Combustion Chamber Layout", SAE Paper 980494, 1998.
- 2) F.-Q. Zhao, M.-C. Lai, and D. L. Harrington, "A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines", SAE Paper 970627, 1997.
- 3) J.-H. Yoo, F.-Q. Zhao, Y. Liu, and M.-C. Lai, "Characterization of Direct-Injection Gasoline Sprays under Different Ambient and Fuel Injection Conditions", *Proceedings of ICLASS*, pp.498-505, 1997.
- 4) F.-Q. Zhao, J.-H. Yoo, and M.-C. Lai, "Spray Characteristics of Direct-Injection Gasoline Engines", SAE Paper 961925, 1996.
- 5) T. Kume, Y. Iwamoto, K. Lida, M. Murakami, K. Akishino, and H. Ando, "Combustion Control Strategies for Direct Injection SI Engines", SAE Paper 960600, 1996.
- 6) W. Lpp, V. Wagner, H. Kramer, M. Wensing, A. Leipertz, S. Arndt, and A. K. Jain, "Spray Formation of High Pressure Swirl Gasoline Injectors Investigated by Two-Dimensional Mie and LIEF Techniques", SAE Paper 990498, 1999.
- 7) J. C. R. Hunt, C. J. Abell, J. A. Peterka, and H. Woo, "Kinematical Studies of the Flow around Free or Surface-Mounted Obstacles; Applying Topology to Flow Visualization", *J. of Fluid Mech.*, Vol. 86, Part 1, pp. 179-200, 1978.
- 8) C. Martinez, J. C. Lasheras, "Dispersion of Bubbles in a Shear Flow", *Proceedings of the 11th Symposium of Turbulent Shear Flow*, Vol.3, 1997.
- 9) J. F. Meyers, "Generation of Particles and Seeding", *Lecture Series VKI*, Vol.1, 1991.
- 10) Z. Han, R. D. Reitz, "Initial Structure of Vaporizing Pressure-Swirl Fuel Sprays", *Proceedings of ICLASS*, pp.474-481, 1997.
- 11) G. Lavergne, O. Adam, J. F. Virepinte, and Y. Biscos, "An Experimental Study on Droplet Interactions", *Proceedings of ICLASS*, pp. 393-400, 1997.