

직접분사식 가솔린 선회분사기 개발에 관한 연구

박용국* · 이충원**
(2000년 5월 24일 접수)

Development of Gasoline Direct Swirl Injector

Park Young-Kug and Lee Choong-Won

Key Words: Gasoline Direct Swirl Injector(GDSI), High Pressure Swirl Injection(HPSI), Swirler(스월러), Pick-Hold Signal(피크-홀드 신호), Dynamic Flowrate(동적유량), Counter-Rotating Recirculation Zone(역방향 재순환영역)

Abstract

The Gasoline Direct Injection(GDI) system has been highlighted due to the improvement of fuel consumption and the control of exhaust emission from gasoline engines. The GDI system includes a high injection pressure, smaller mean diameter, good spray characteristics and stability. We were interested in the development for gasoline direct swirl injector(GDSI) in which the swirler is specially designed with an incident angle. Numerical analysis was utilized to investigate the internal flow of GDSI with a goal to determine the swirl incident angle and needle lift. Accordingly, it describes characteristics of a GDSI in which the flowrate and spray characteristics are satisfied, especially the spray tip penetration decreases, compared with other type GDI, mean diameter of droplets is from $20\mu\text{m}$ to $25\mu\text{m}$ and spray angle ranges from 64° to 66° .

기호설명

- l_o : 오리피스 길이(mm)
- d_o : 오리피스 직경(mm)
- A_p : 스월 총 입구면적
- D_s : 선회실 직경
- L_s : 선회실 길이
- L : 분무도달거리
- \dot{m} : 질량유량

1. 서론

가솔린 직접분사식(GDI)엔진은 연비향상 측면과 배출가스 규제에 대응할 수 있는 엔진으로 각광 받고 있다.

GDI엔진의 개발에 있어 가장 큰 문제점은 기존의 삼원 촉매장치를 대체할 수 있는 희박연소용 배출가스 처리장치와 전 운전범위에서 생기는 과도한 미연탄화 수소의 배출이다. 이 중에서 미연탄화수소의 배출은 인젝터의 성능과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 이를 위해 인젝터는 정확한 연료량 제어, 빠른 응답성 및 내구성 과 같은 기구적 조건과 미립화된 액적의 고른 공간분포, 속도 및 크기 등과 같은 분무 성능에 대한 연구가 필요하다.

지금까지의 연구결과를 살펴보면 Evers⁽¹⁾는 Allied Signal HPSI에 대하여 실험한 결과, 액적의 크기는 전 분무장에서 분사압력이 높을수록 감소하였으나, 분위기(噴圍氣) 압력 및 스월강도가 커질수록 증가됨을 밝혔다. Zhao⁽³⁾는 가시화 기법을

* 경북대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 경북대학교 공과대학 기계공학부

E-mail : chwlee@kyungpook.ac.kr

TEL : (053)950-5576 FAX : (053)956-9914

이용하여 분무조건에 따른 분무성장과정을 조사하였다. Pontoppidan⁽⁴⁾ 등은 3가지 유형의 핀틀타입 인젝터에 대하여 연구한 결과, 분무특성은 선회효과가 유도된 경우는 그렇지 않은 경우 보다 주위 유동장의 영향을 많이 받는다는 것을 밝혔다.

한편 국내의 경우, 김⁽⁵⁾과 최⁽⁶⁾ 등은 기존 PFI (Port Fuel Injector)를 개조하여 GDI 인젝터를 개발한 결과, 분무초기의 평균입경은 기존의 다른 인젝터에 비하여 매우 우수하였지만 분무유량이 상대적으로 작게 설계되었다.

그 외 GDI 인젝터에 대한 많은 연구가 진행되고 있지만 대부분 이미 개발 완료된 인젝터의 분무특성을 파악하는 수준이다.

본 연구는 기존의 연구결과를 바탕으로 GDI 인젝터를 설계, 제작하여 분무현상과 그 특성을 파악함으로써 앞으로의 연구를 위한 설계변수에 대한 자료를 축적하는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치

GDI엔진에 적합한 인젝터의 성능 파악은 엔진 개발에 앞서 선행되어야 할 사항이다. 일반적으로 인젝터 성능은 네 가지 정도로 나누어 파악할 수 있다.⁽⁷⁾

- 충분한 유량을 얻을 수 있는가?
- 적합한 분무특성과 구조를 가지고 있는가?
- 엔진연소에 충분한 미립화 성능을 갖는가?
- 실제엔진 적용 시 deposit에 대한 내성을 갖는 구조인가?

이 중 deposit 문제를 제외하고는 인젝터의 설계단계에서 최적화 연구를 통해 적합한 분무특성과 미립화 성능을 얻어낼 수 있다.

Fig. 1은 본 연구를 통하여 개발될 인젝터 하단부의 개념도를 나타낸 것이다.

인젝터 하단부는 시트 케이스(seat case), 스윌러(swirler) 및 니들(Needle)로 구성된다.

스윌러가 시트 케이스에 조립되고 그 중간에 니들이 솔레노이드(solenoid)에 의해 상하운동을 하면서 연료를 단속하는 구조로 되어있다.

특히 스윌러는 분무 축방향에 대하여 경사각(swirl incident angle)를 갖는다. 그 이유는 경사각을 적절히 설계함으로써 비교적 낮은 분사압력으로도 GDI 분무조건에 적합한 분무특성을 얻을

수 있을 것으로 판단되기 때문이다.

한편 니들 형상은 일반적으로 많이 사용되는 ball형이 아니라 cone형 니들을 연구대상으로 하였다.

Cone형 니들은 ball형 니들에 비하여 유로의 변화는 크지만 스윌러와 니들 사이에서 형성되는 non-swirl volume이 상대적으로 작아져 초기 분무특성이 우수하며, 또한 sac volume을 작게 설계할 수 있는 장점이 있기 때문이다.

2.1 Numerical Analysis

인젝터의 개발과정에서 설계변수에 의한 시행착오를 줄이기 위하여 Fig. 1에 원형으로 표시된 부분에 대하여 상용코드인 CFD-ACE를 사용하여 수치해석을 실시하였다.

계산의 목적은 스윌러 경사각 및 니들행정 변화에 대한 내부유동의 변화를 파악하는 데 있다.

이는 내부유동형태에 의하여 유량 및 분무특성이 결정되기 때문이다.

특히 간헐 분사방식 인젝터에서는 니들 팁 부분에서 발생하는 와류(渦流)는 초기 분무특성 및 분무 재현성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Table 1은 계산조건과 변수들을 나타낸 것이다.

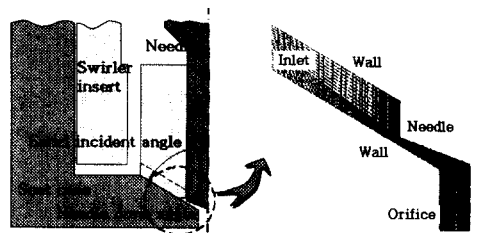


Fig. 1 Conception of new gasoline direct injector

Fig. 2 2-D Grid Setup

Table 1 Numerical analysis condition and variables

Items	Specifications
Algorithm	SIMPLEC
Flow condition	Incompressible, Unsteady, Non-swirl
Liquid properties	ρ : 751kg/m ³ v : 7.04×10^{-5} m/s
Boundary condition	Inlet : P _T 3.0MPa Outlet : P _T 0.1MPa
Grid	Axisymmetric condition
Swirler incident angle	90, 110, 120, 130°
Needle tip angle	140°
Needle lift	50, 70, 100, 120 μ m

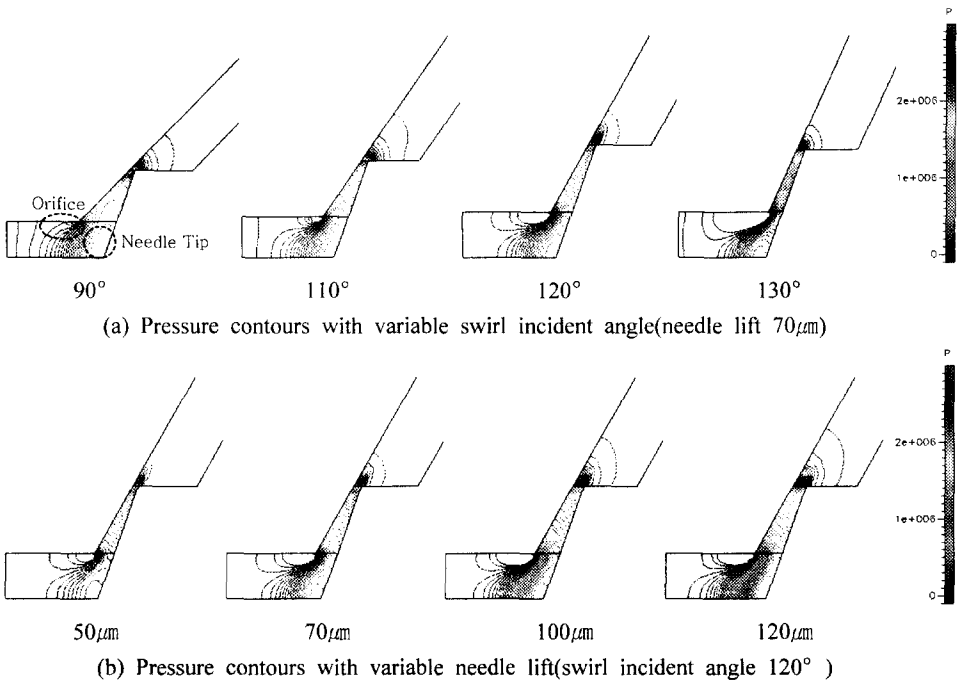


Fig. 3 Characteristics of internal flow of the GDSI in a non-swirl condition

일반적으로 선회형 노즐에서는 스웰포트에 의하여 유로가 제한되기 때문에 대부분의 압력강하는 오리피스에서 일어난다. 그러므로 선회유동조건에서는 니들 팁 부분의 와류(渦流)를 관찰하기 어렵다.

이러한 이유로 노즐 형상변화에 대한 니들 팁 부분의 유동 현상을 파악하기 위하여 비 선회 유동조건으로 해석하였다.

이와 같이 비록 비 선회유동 조건으로 계산하더라도 유량의 정량적인 차이는 있겠지만 그 경향은 유체역학 법칙을 따를 것으로 판단된다.

Fig. 2는 비선회 유동조건으로 계산하기 위한 Grid를 나타낸 것으로서 총 2850의 셀을 가지며 경계조건으로 입구와 출구 압력값을 사용하였다.

Fig. 3은 비선회 유동조건에서 경사각과 니들 행정변화에 대한 내부압력변화를 각각 나타낸 것이다.

그림에 표시된 바와 같이 모든 조건에서 오리피스와 니들 팁에서 와류가 발생됨을 알 수 있다.

이 중 오리피스에서 발생하는 와류는 오리피스 유입부의 급격한 유로 변화에 의하여 발생되며, 스웰 경사각이 커질수록 그 크기는 증가하지만 니들행정 변화에 의한 영향은 작은 것으로 나타

났다. 그러므로 오리피스 유입부 형상을 부드럽게 제작한다면 이러한 현상은 감소될 것이라고 판단된다.

만약 실제유동에서와 같이 유로가 스웰리에 의하여 제한된다면 유체는 오리피스 내벽을 따라 유동하기 때문에 이와 같은 오리피스부의 와류는 상당히 감소될 것으로 판단된다.

한편, 니들 팁에서 발생하는 와류는 스웰 경사각이 클수록 감소된다. 이는 경사각이 커질수록 시트 게이스와 니들에 의하여 형성되는 유로의 면적변화가 작아지기 때문이라고 판단된다.

또한 니들행정이 증가할수록 와류 크기는 ball형 니들에서처럼 조금씩 작아지는 것을 알 수 있다.⁶⁾ 하지만 ball형 니들에 비하여 니들행정 변화가 와류형성에 미치는 영향은 훨씬 작게 나타났다. 이러한 이유는 cone형의 경우 니들과 니들 시트 사이의 sac volume이 ball형보다 작기 때문이라고 판단된다.

Fig. 4는 스웰 경사각에 대하여 니들행정 변화에 따른 질량유량분포를 나타낸 것이다.

모든 경우에서 유량은 초기에는 니들행정이 커질수록 증가하다가 100 μm 부근부터 점차 수렴되는 것을 예측할 수 있다. 이는 니들행정이 증가

하더라도 노즐 오리피스 면적이 일정하여 임계유량에 접근하기 때문이라고 판단된다.

각 경사각 변화에 대한 유량변화를 살펴보면, 유량은 스웰 경사각이 커질수록 감소되어 스웰 경사각이 130° 인 경우는 다른 경우에 비하여 10~60% 작게 나타난다.

이는 니들 팁의 경사각도가 table 1과 같이 고정되어 있어 스웰 경사각이 커질수록 유로 단면적이 점점 감소되기 때문이다.

특히, 스웰 경사각이 110° 와 120° 인 경우의 유량분포는 니들 행정변화에 대하여 서로 비슷한 경향을 갖지만 니들 행정변화에 대한 유량변화율은 스웰 경사각이 120° 인 경우가 우수하다.

즉, 니들행정이 작은 쪽에서는 유량이 작으며, 니들행정이 커질수록 상대적으로 많은 유량특성을 나타낸다.

이렇게 되면 분무초기의 유량은 작고 정상상태 분무에서는 충분한 유량을 얻을 수 있는 장점이 있다.

이상의 내용을 종합해보면 니들 팁에서 형성되는 와류는 니들행정에 대한 영향은 크지 않지만 스웰 경사각 변화에 대한 영향은 뚜렷하게 나타났다. 따라서 인젝터의 스웰 경사각은 내부유동 및 유량특성뿐만 아니라 선회실 직경을 고려하여 120° 로 결정하였다.

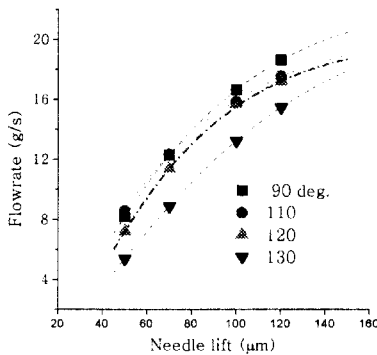


Fig. 4 Mass flowrate

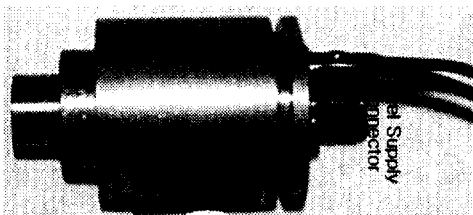


Fig. 5 Gasoline Direct Swirl Injector (GDSI)

이는 일반적으로 선회노즐의 분무각은 선회실 직경에 비례하여 증가하기 때문이다.⁽⁸⁾

2.2 Gasoline Direct Swirl Injector (GDSI)

또한 니들행정은 유량특성과 응답성을 고려하여 100μm으로 결정하였다. 참고적으로 상용 인젝터의 니들행정은 40~70μm을 채택하고 있다.

Fig. 5는 계산결과를 바탕으로 제작된 GDSI의 전체 형상이며 주요 제원은 Table 2와 같다.

인젝터의 외장부는 솔레노이드 케이스와 노즐 어셈블리 케이스로 구성되며 나사로 서로 조립된다.

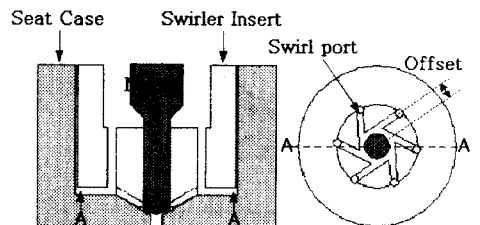
솔레노이드 케이스는 코일의 발열에 의한 성능저하를 막기 위하여 공급되는 연료에 의하여 냉각되는 구조로 되어있다.

노즐 어셈블리는 니들, 시트 케이스 및 스웰러로 구성된다. 니들과 시트 케이스는 내구성과 기밀을 유지하기 위하여 열처리 후 이를 연마하였다. 특히 니들 아마추어(amature)는 자화도 및 잔류자기 세기 등을 고려하여 열처리된 연강으로 제작한 뒤, 니들과 서로 조립된다.

한편 기존의 연구결과에서 스웰포트 개수는 미립화 성능이나, 분무도달거리등에 미치는 영향이 거의 미미하다고 발표하고 있지만,⁽⁶⁾ 그 개수가

Table 2 Specifications of the GDSI

Items	Specifications
d_o	0.9
l_o/d_o	1.0
D_s/d_o	3.37
L_s/D_s	0.34
Swirl incident angle	120°
Needle cone angle	140°
Needle lift	100μm
Coil resistance	1.67Ω, 20C°
Number of turns	252
Ampere-turn	2,250



(a) Axial view (b) Horizontal view

Fig. 6 Swirl generator inside GDSI

많을수록 분무의 상류에서 더욱 고른 분무장을 얻을 수 있을 것으로 판단되어 Fig. 6과 같이 6개의 스윙 포트가 선회실 중심에서 1.2mm offset되는 구조로 되어있다.

3. 본 론

3.1 유량 및 분무특성

Fig. 7은 인젝터의 구동회로에 인가되는 피크-홀드신호와 솔레노이드에 공급되는 전류파형을 각각 나타낸 것이다.

전류파형은 전류측정장치(AM503S, Tektronics)를 이용하여 계측하였으며, 그 결과 피크전류와 홀드전류의 크기는 각각 12A, 8A이며, 그 기간은 구동신호와 정확히 일치된다.

피크전류를 크게 한 이유는 니들 행정이 비교적 크게 제작되었기 때문에 니들 개방시간을 최소화하기 위함이다. 한편 전체 분사기간은 홀드신도 기간과 같다.

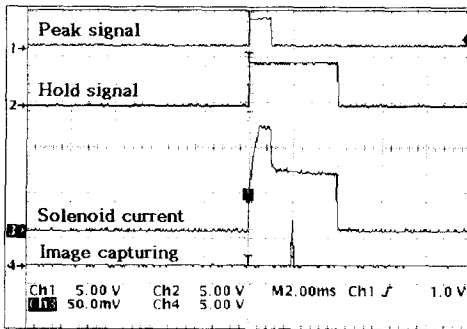


Fig. 7 Pick-hold signal and solenoid current

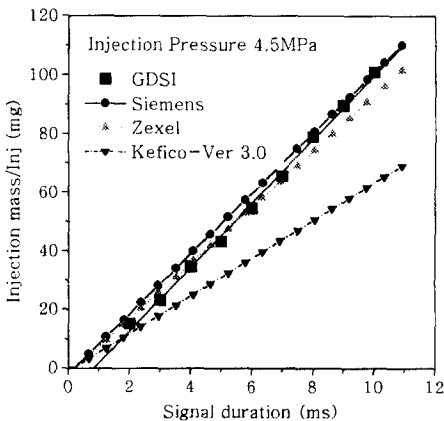


Fig. 8 Dynamic flowrate characteristics

Fig. 8은 각 분사기간에 대한 동적유량(dynamic flowrate) 특성을 서로 비교한 것이다. 유량은 각 분사기간 동안 20~ 50회 분사한 량을 전자저울로 측정한 후 이를 평균하였다. 그 결과 유량은 식 (1)과 같이 분사기간에 대하여 선형적으로 증가하였다.

$$\dot{m} = 10.758t - 8.458 \text{ (g/s)} \quad (1)$$

한편, GDI 인젝터는 높은 회전수에서도 짧은 분사기간동안 전부하(full load)를 유지하기 위해서는 충분히 큰 정적유량(static flowrate)을 확보해야만 한다. 그림에 나타난바와 같이 제작된 GDSI는 기존 제품과 거의 일치하는 정적유량을 갖는다.

정적유량은 오리피스 직경에 의하여 결정되기 때문에 GDSI의 오리피스 직경은 적당하다고 판단된다.

3.2 분무현상

제작된 GDSI의 분무현상을 관찰하기 위하여 대기압 조건에서 분무실험을 시행하였다.

Fig. 9는 분사압력 및 분사기간이 각각 4.5MPa, 2.5ms일 때, shadow graph기법으로 촬영한 분무거동을 나타낸 것이다.

분사신호로부터 0.7ms 이후에 분무가 형성되기 시작하여 종료시점인 2.5ms에는 분무가 종료된다. 따라서 실제 분사지속시간은 약 1.8ms 정도이다.

분무현상은 크게 초기, 정상상태 및 말기 과정으로 나눌 수 있다.

분무 초기는 non-swirl 및 sac volume 내의 연료가 충분한 속도를 얻지 못하여 대부분 액체제트에 가까운 분무형태에서 점차 원추형 분무(cone spray)로 발전한다. 이 시기에서는 분무선단(tip)과 분무주류(main body)를 명확히 구분할 수 있다.

정상 분무상태에서 분무선단은 계속 분열되면서 분무장내로 보다 넓은 공간분포를 유지하게 되고, 스윌러에 의하여 충분한 각 운동량을 갖는 연료가 분사되면서 원추형 분무주류의 성장이 뚜렷하게 나타난다.

특히 이 시기에서는 분무표면과 주위 공기와의 경계면에서 역방향 재순환영역(counter-rotating recirculation zone)이 형성되어 성장하는 것을 관찰할 수 있다.

이러한 분무구조는 HPSI의 가장 큰 특징으로서 분무군내로의 공기유입(entrainment)을 촉진시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

Fig. 10은 분사압력 변화에 대한 역방향 재순환영

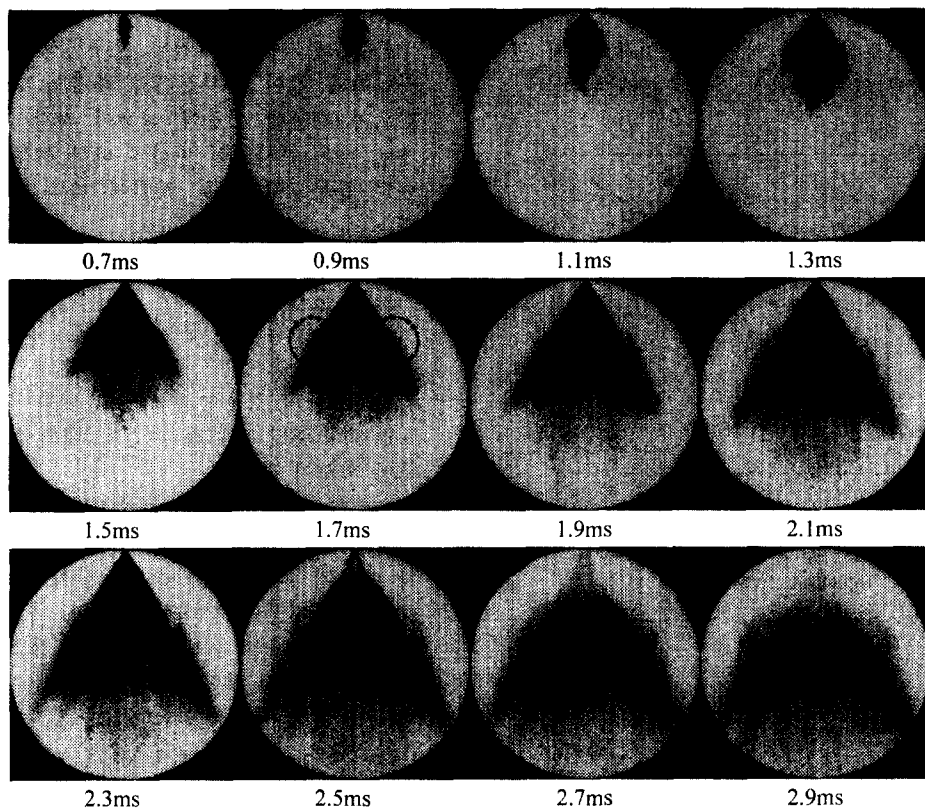


Fig. 9 Time history of GDSI spray phenomena ($P_{inj} = 4.5\text{MPa}$, $T_{inj} = 2.5\text{ms}$)

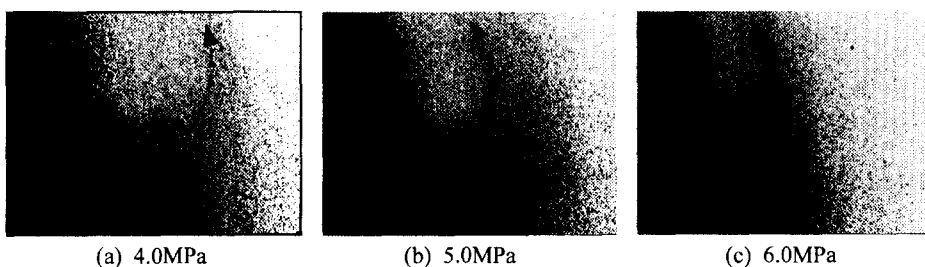


Fig. 10 Visualization of counter-rotating recirculation zone

역의 형상변화를 파악하기 위하여 축 방향 30mm, 반경방향 15mm 부근을 확대 촬영한 것이다.

그림에 나타난 바와 같이 분사압력이 증가할수록 재 순환 영역의 시간척도(time scale)는 작아지고 그 구조는 분무주류 축으로 치우치는 것을 관찰할 수 있다. 이는 분사압력이 증가할수록 축 방향 운동량의 증가율이 반경방향 보다 크기 때문이라고 판단된다.

한편 분사 종료시점인 2.5ms에서는 니들의 바운스(bounce)현상이 발생되는데, 이는 니들 복귀용 스프링의 상수 값을 큰 것으로 교체한다면 이

러한 현상은 방지될 수 있을 것으로 판단된다.

분사말기에는 니들이 닫히면서 운동량 공급이 중단되어 분무군의 축 방향 진행은 둔화되고 분열된 액적들은 역방향 재 순환 영역을 따라 계속 운동함으로써 공기와의 혼합이 이루어지고 있는 것을 관찰할 수 있다.

한편 정상분무상태부터 분사말기 동안 역방향 재 순환 영역을 기준으로 하류방향에 액적 수밀도(number density)가 높은 영역이 길게 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

이러한 현상은 스웰포트 채널 및 오리피스

표면이 거칠게 가공됨으로서 발생하며, 분무군내에 국부적으로 농후한 영역을 형성함으로써 연소현상에 나쁜 영향을 미칠 것으로 판단된다.

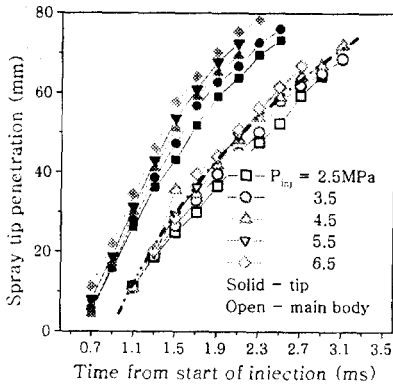


Fig. 11 Tip penetration for different injection pressure

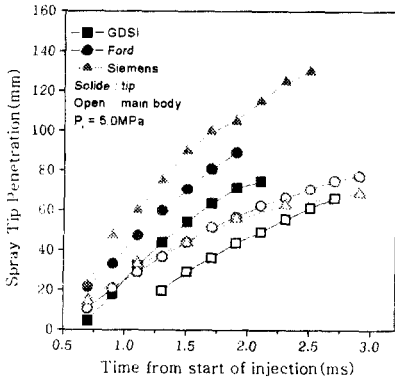


Fig. 12 Comparison with tip penetration for different type injector

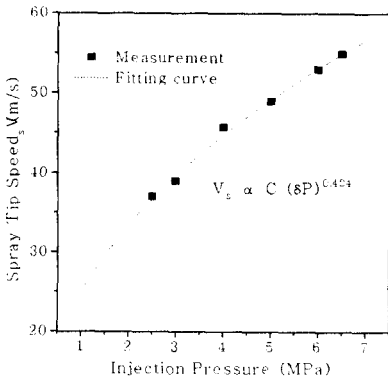


Fig. 13 Relation between injection pressure and spray tip speed

3.3 분무도달거리

분무도달거리는 시간별 분무현상 결과에서 나타난바와 같이 분무선단과 주류의 거동이 각각 다르기 때문에 이들에 대하여 각각 계측하였다. Fig. 11은 분사압력 변화에 따른 분무선단 및 주류의 분무도달거리를 시간에 따라 나타낸 것이다.

분무선단의 도달거리는 분사압력이 증가할수록 시간이 경과될수록 매우 빠르게 증가한다. 특히 시간이 경과될수록 분무도달거리는 뚜렷하게 감소되고 있음을 알 수 있다.

분무주류의 경우는 분사압력 변화에 대한 분무도달거리 뿐만 아니라 시간에 대해서도 분무선단에 비하여 작다.

축방향 운동을 하는 분무선단은 주위 공기의 저항(drag)을 많이 받지만, 분무주류의 경우는 주위 공기가 액적 운동방향과 같이 반경방향으로 유동하기 때문에 상대적으로 공기 저항이 작아 시간변화에 대한 분무도달거리의 감소율이 작다. 따라서 주류의 분무도달거리는 모든 분사압력에 대하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{cone} = C \cdot \log t \quad (2)$$

Fig. 12는 GDSI와 기존 GDI 인젝터의 시간변화에 따른 분무도달거리를 서로 비교한 것이다.

전체적으로 GDSI의 분무선단 및 주류의 도달거리는 다른 형태보다 각각 20~80%, 10~50% 작게 나타났다. 이는 GDSI의 스윌러 포트 길이가 다른 형태의 GDI보다 50% 길어져 유동저항이 상대적으로 증가되었기 때문이라고 판단된다. 또한 분무선단의 경우는 그래프의 기울기가 거의 비슷하기 때문에 속도도 서로 비슷하다고 할 수 있다.

한편 분무주류의 경우, 분사초기에는 서로 뚜렷한 차이를 보이다가 분사말기로 갈수록 비슷하게 진행됨을 알 수 있다.

이는 GDSI의 non-swirl 및 sac volume의 크기가 다른 것보다 상대적으로 작게 설계됨으로서 분무선단이 갖는 축 방향 운동량이 작고, 적절한 스윌 경사각을 가지고 있기 때문에 이라고 판단된다.

이와 같이 같은 분사압력에서 분무도달거리가 감소되면 액적이 실린더 혹은 피스톤 벽면에 충돌하는 Wall impingement 량이 줄어들게 되어 연소현상에서 유리하게 작용될 것으로 판단된다.

Fig. 13은 측정된 데이터로부터 계산한 분무선

단 평균속력과 분사압력과의 관계를 나타낸다.

일반적으로 속도와 압력은 $V_s = C(\Delta P)^{0.5}$ 의 관계식으로 표현되지만 측정 데이터로부터 계산된 경우는 지수 값이 작게 나타난다.

이는 분사시간이 매우 짧고 연료가 스웰 포트 를 거쳐 노즐 오리피스로 유입되는 동안 유동손실이 발생되어 선회실로 유입되는 연료의 압력은 공급압력에 비하여 상당한 압력손실이 일어난 것으로 판단된다.

3.4 분무각도

분무각은 노즐선단에서 분무주류 표면에 접하는 영역으로 정의하였다.

Fig. 14는 분사 압력별 시간에 대한 분무각의 변화를 나타낸 것이다.

모든 분사압력에 대하여 분무각은 시간이 경과할수록 감소하여 정상상태분무에서는 거의 일정한 값을 갖는다.

일반적으로 선회노즐에서 분무각은 Taylor 이론에 의하여 분사압력과 무관하고 선회실 직경의 크기에 비례한다.⁽⁸⁾ 이러한 이유로 인젝터 설계단계에서 Table 2에서와 같이 D_s/d_o 의 값을 고려하였다.

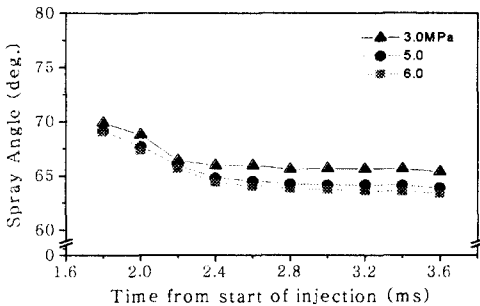


Fig. 14 Time history of spray angle

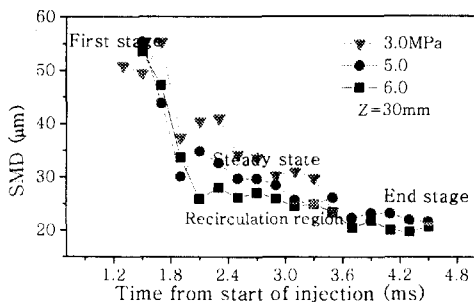


Fig. 15 Time history of SMD distributions

3.5 평균입경

평균입경은 화상처리방법을 이용한 입경처리장치(PMAS, V-Tek)를 사용하여 분무중심과 반경방향에 대하여 측정하였다. 측정의 신뢰성을 높이기 위하여 각 지점에서 계측사이의 시간 간격을 15ms로 하여 얻은 30 frame 영상으로부터 액적의 크기를 측정하였다.

Fig. 15는 축방향 30mm, 반경방향 15mm 지점에서 분사압력에 대한 평균입경의 시간변화를 나타낸 것이다.

액적의 평균입경은 시간이 경과될수록 분사압력이 증가할수록 작아진다.

분무초기는 분열현상에서 파악된바와 같이 비교적 큰 액적들이 존재하고, 정상상태 분무에서 평균입경은 급격히 작아짐을 알 수 있다.

이러한 현상은 기존 GDI 인젝터의 연구결과와 일치한다.^(1,7,9)

한편 재순환영역에서는 시간이 경과됨에 따라 평균입경의 크기가 변하는데, 이는 분무표면에 형성되는 역방향 재순환영역이 분무 축방향으로 상하 진동을 일으킴으로서 입경 계측 위치가 변하기 때문이라고 판단된다.

분사말기에서는 분사압력에 따라 조금 차이는 있지만 대체로 20~25μm의 작은 액적들이 형성됨을 알 수 있다.

4. 결론

기존의 연구결과와 본 연구에서 수행한 계산결과를 바탕으로 120° 스웰 경사각 및 cone형 needle을 갖는 GDSI를 설계, 제작하여 대기압 조건에서 분무현상과 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) GSDI의 유량은 시간에 대하여 선형적으로 변화하며 충분한 정적유량을 갖는다. 유량식은 $\dot{m} = 10.758t - 8.458$ (g/s)이다.
- (2) HPSI 분무구조의 특징인 역방향 재순환영역이 정상분무상태에서 형성되었다.
- (3) 분무선단과 주류의 도달거리는 스웰 경사각과 cone형 needle에 의하여 non-swirl 및 sac volume의 크기를 줄임으로서 GDI조건에 유리하게 나타났다.
- (4) 분무각은 성장한 정상분무 상태에서 64~66° 정도로 나타났으며, 이때 분사압력에 의한 영

향은 거의 없다.

(5) 분무말기의 평균입경은 20~25 μ m로서 이는 GDI의 조건으로 적당하였다.

연구결과에 의한 GDSI의 설계 및 제작시의 개선점은 다음과 같다.

1. 스웰러 중앙부와 니들 사이의 설계 및 제작 오차를 줄여 초기 분무특성을 개선하여야한다.
2. 스웰러 및 오리피스의 표면가공을 더욱 매끄럽게 하여 고른 분무장을 형성하도록 한다.
3. 니들 질량과 복원 스프링의 운동계를 해석하여 2차 분무를 방지하여야한다.

이상의 연구를 수행함으로써 GDI인젝터의 설계 및 제작에 있어 상당한 기술을 확보할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Evers, L. W., 1994, "Characterization of Transient Spray from High pressure Swirl Injector," SAE paper 940188.
- (2) Parrish, S. E., and Farrell, P. V., 1997, "Transient Spray Characteristics of Direct Injection Spark Ignited Fuel Injector," SAE 970629.
- (3) Zhao, F. Q., Yoo, J. H., and Lai, M. C., 1996, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engines," SAE paper 961925.
- (4) Pontoppidan, M., Bella, G., and Rocco, V., 1997, "Direct Fuel Injection - A Study of Injector Requirements," SAE paper 970628.
- (5) 백승국, 최승연, 이동률, 윤수현, 강경균, 김주영, 최상민, 1999, "GDI엔진용 고압 직분식 선회연료 인젝터의 개발," 한국자동차학회 춘계학술대회, pp. 203~208.
- (6) 최상민, 장창수, 우동기, 1998, "직접분사식 엔진용 Fuel Injector 개발," 한국과학기술원 기술보고서.
- (7) Fraidl, G. K., Piock, W. F., and Wirth, M., 1996, "Gasoline Direct Injection: Actual Trend and Future Strategies for Injection and Combustion Systems," SAE paper 960465.
- (8) Lefebvre, H., 1989, "Atomization and Spray," p. 282.
- (9) Lefebvre, H., 1989, "Atomization and Spray," p. 286.
- (10) Kume, T., Iwamoto, Y., Murakami, M., Akishni, K., and Ando, H., 1996, "Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine," SAE paper 960600.