

직접분사식 가솔린 선회분사기 개발에 관한 연구 II

Development of Gasoline Direct Swirl Injector II

박용국*, 이충원**
Youngkug Park, Choongwon Lee

ABSTRACT

Generally fuel injection system using solenoid have some problems between control signal and mechanical movement like as time lag. Main purpose of the present study is to help the design optimization of GDSI for real engine application. We have adopted two different solenoid driving circuit, namely saturation and pick-hold type and have investigated experimentally the current, needle force, needle opening duration and injection quantity. The pick-hold type driving circuit surpassed a saturation type in the response time and precision control of injection quantity. Accordingly, Using characterization data of operating factors such as time constant, driving force and so on, can be evaluated and adjusted to obtain an optimum injector performance.

주요기술용어 : Gasoline direct swirl injection(GDSI), Solenoid(솔레노이드), Saturation(새츄레이션), Pick-hold(피크-홀드), Time constant(시상수), Time lag(시간지연), Driving force(구동력), Static flowrate(정적유량)

Nomenclature

i : current, A
T : time, s
R : resistance, Ω
 τ : time constant, ms
L, l : length, mm
m : flowrate(g/s)
P : pressure

I : input signal
r : real signal
f : F fuel

Subscripts

o : orifice
s : swirler

1. 서론

GDI(Gasoline Direct Injection)방식은 연료를 연소실내에 직접분사하기 때문에 엔진 부하 변동에 따른 응답성이 우수할 뿐만 아니라 공연비를 정확하게 제어함으로써 고효율 연소를 실현할 수 있는 장점이 있다.¹⁾ 이러한 장점을 구현하기 위하여 인젝터(injector)는 정확한 시기에 정확한 양의 연료를 분사할 수 있는 구동능력과 충분한 정적유량 및 우수한 미립화 특성을 갖추어야 한다.

* 회원, 경북대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 경북대학교 공과대학 기계공학부

일반적으로 GDI 인젝터의 성능은 분무특성을 결정하는 기계 및 기구적인 요인과 응답성 특성에 영향을 미치는 전자적인 요소에 의하여 결정된다. 하지만 현재까지의 연구결과를 살펴보면 대부분 양산중인 인젝터의 분무특성에 대한 연구가 주류를 이루어 왔다.

이러한 이유로 직접분사식 가솔린 선회분사기(GDSI)를 개발하여 분무특성을 파악하였으며,²⁾ 본 연구에서는 개발된 GDSI의 응답특성을 파악하기 위하여 서로 다른 특성의 구동회로를 적용시켜 분무현상 및 유량특성 등을 파악하여 GDSI의 개선방안 및 실제 양산에 필요한 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치

2.1 인젝터(Injector)

Fig. 1은 GDSI의 개략도를 나타낸 것이다. 인젝터는 니들 어셈블리, 스왈러, 시트 케이스, 솔레노이드 및 외장 부분으로 구성되며, 이들은 각각 시트 케이스와 솔레노이드 케이스에 삽입된 뒤 외장부의 나사에 의하여 서로 조립되는 구조이다.

시트케이스내의 각 부품은 인젝터 내부유동장 형성과 밀접한 관계를 갖기 때문에 수치해석을 이용하여 치수와 형상을 Table 1과 같이 결정하였다.²⁾ 특히 시트케이스는 반자성체인 황동으로 제작하여 자속 손실을 방지하였다.

일반적으로 니들은 스프링 복원력에 의하여

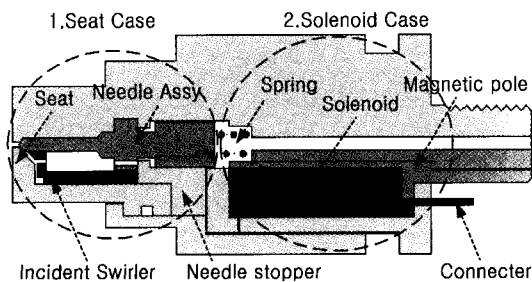


Fig. 1 Schematic of Gasoline direct swirl injector

Table 1 Specifications of the GDSI

Item	Specifications
d_o	0.9
l_o/d_o	0.7
D_s/D_o	3.37
L_s/D_s	0.34
Swirl incident angle	120°
Needle cone angle	140°
Needle lift	100 μ m
Needle assy. weight	50.133mg

Table 2 Comparison of solenoid specifications

Item	GDSI	HPSI
Resistance	1.67 Ω	1.0 Ω
Turns	252	90
Max. current	8A	14A
Coil Dia.	0.55mm	0.3mm
Outside Dia.	34mm	16.0mm
Inside Dia.	10mm	9.0mm
Length	25mm	6.0mm

달히는데 구동력에 비하여 스프링에 의한 힘이 상대적으로 작기 때문에 스프링 상수가 커져도 니들 상승시간에는 별다른 영향이 없지만 스프링 상수가 너무 커져서 장시간 동작시킬 경우 니들과 니들 시트에 마모가 발생되어 기밀 유지가 어렵게 된다. 이러한 이유로 상용 PFI의 6N/m보다 큰 8N/m의 스프링 상수를 채택하였다.

2.2 솔레노이드

고압 인젝터의 솔레노이드부는 MPI보다 큰 흡인력과 빠른 응답성을 실현하기 위하여 저 저항, 고 전류형이 적용된다. 이는 회로의 임피던스(impedance)값을 작게 하여 전류상승을 빠르게 함으로써 니들 개방시간을 최대한 줄일 수 있기 때문이다.

솔레노이드의 흡인력은 니들 개방시간을 좌우함으로써 인젝터의 유량성능에 직접적인 영향을 미치는 중요한 설계요소로서 식(1)과 같이 표시된다.

$$F = \frac{\mu S^2 A}{2X^2} \quad (2)$$

여기서 μ , S , A , X 는 각각 자성재료의 투자율(permeability), 암페어턴(ampere turn), 플런저(plunger) 단면적 및 공극(air gap)를 나타낸다.

식(1)과 같이 흡인력은 암페어턴 및 자성체의 투자율이 클수록, 공극이 작을수록 증가됨을 알 수 있다. 이러한 이유로 인젝터가 완전히 조립된 상태에서 자극(magnetic pole)과 니들 플런저(plunger) 사이의 공극은 복원 스프링의 길이 및 니들 행정(stroke)을 고려하여 최소가 되도록 하였다.

솔레노이드 케이스와 자극은 자장형성에 중요한 부품으로서 양산 인젝터의 경우 기능성 재료인 전자 SUS 혹은 연자성 합금을 사용하지만 본 연구에서는 비교적 투자율이 큰 연강을 탈탄(decarburization)하여 설치하였다.

자극은 완전히 조립된 상태에서 솔레노이드의 길이보다 짧게 설계함으로써 니들의 플런저가 솔레노이드 내부로 들어가는 구조로 하였다.

이는 솔레노이드 외부보다 내부에서 자속 밀도(magnetic intensity)가 클 뿐만 아니라 자속 형성을 자극과 니들 플런저 사이로 제한함으로써 손실을 방지하여 보다 큰 흡인력이 작용할 수 있기 때문이다.³⁾

본 실험에 적용하기 위하여 제작된 솔레노이드와 일본 M사 HPSI(High Pressure Swirl Injector)의 솔레노이드 사양을 비교하여 나타낸 것이다.

2.3 인젝터 구동회로

GDI는 기존의 PFI(Port Fuel Injection)과 달리 공급되는 연료량으로 엔진의 출력을 제어하기 때문에 보다 정확한 분사시작 시기 및 분사시속 시간에 대한 제어가 요구된다.

일반적으로 솔레노이드는 구동신호와 실제 작동사이의 시간지연(time lag)이 존재하기 때문에 이를 최소로 할 수 있는 구동회로가 필요하다.

구동회로는 Fig. 2와 같이 기존 PFI등에 적용하고 있는 것과 같이 솔레노이드 양단에 작동기간동안 일정 전압을 인가하는 정전압형 새츄레이션(saturation) 방식과 초기 작동시간에는 많은 전류를 흐르도록 하여 초기 구동력을 크게 한 뒤, 플런저가 완전히 움직인 후에는 전류 양을 줄임으로서 과부하를 방지하는 전류 제어 방식인 피크-홀드(pick-hold)형이 있다.

피크-홀드형은 정전압형 보다 구조가 복잡하며 제어가 까다롭고 구동회로에서 열이 발생한다는 단점이 있지만 회로의 특성상 반응속도가 빠르기 때문에 최대구동력을 얻는 자속 포화시간까지의 시간 지연을 줄일 수 있다는 장점이 있다.⁴⁾

이러한 피크-홀드형은 커패시터 방전형과 저항조정형이 있는데,⁵⁾ 커패시터 방전형은 인가 전압을 조정하여 피크전류의 크기를 조정하고, 커패시터 용량에 의하여 피크전류 기간을 조절하지만 저항조정형 방식은 Fig. 2(b)와 같이 피크전류의 크기는 저항 R_p 에 의하여 조절되며 홀드 전류는 R_p 와 R_1 의 조합과 전원의 크기에 따라 결정되며 전류 기간은 입력 피크신호의 기간으로 간단히 조정할 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 저항 조정형 피크-홀드방식을 적용하였다.

한편 전류가 끊어진 직후 코일에 유도되는 높은 역기전력으로부터 소자를 보호하는 다이오드는 대부분의 경우 Fig. 2의 (a)에서와 같이 역바이어스(reverse bias)로 연결하는데, 이 경우 잔류 전류가 소멸하는데 시간이 늦어져 니들이 원래 상태로 복귀하는 시간이 길어지게 된다. 이러한 이유로 다이오드를 순방향(forward bias)으로 연결하고 그림과 같이 피크신호 FET는 유지전류보다 상대적으로 큰 피크전류에 대하여 소자를 보호하기 위하여 드레인 전류 값이 큰 부품을 채택하였다.

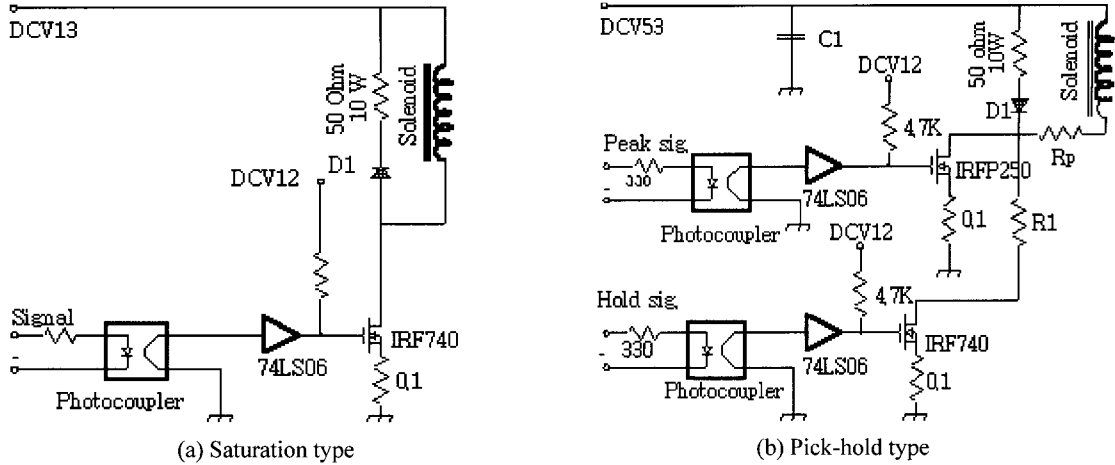


Fig. 2 Circuit diagrams of solenoid driver

2.3 인젝터 특성 시험장치

구동회로에 따른 솔레노이드 및 인젝터의 특성을 계측하기 위하여 Fig. 3과 같이 시험장치를 제작하였다.

솔레노이드를 구동하기 위한 각 입력 신호 데이터는 시간조정장치 구동 프로그램에서 RS232 통신으로 신호발생기로 전송된다. 시간조정장치(②)는 7채널의 디지털 및 1채널 아날로그 신호를 출력하도록 제작되었다.

각 디지털 신호는 해상도가 100ns이며, 최고 137ms까지 조정이 가능하며, 아날로그 출력은 DC 0.3~12V 범위에서 조정 가능하기 때문에 이를 이용하여 분무 가시화용 광원의 밝기를 조정하였다.

시간 조정장치의 출력은 솔레노이드 구동회로(⑦)에 입력되어 인젝터(⑤)를 구동시킨다. 이때 솔레노이드에 공급되는 순간전류는 전류 프로브(⑨, Tektronix, AM503) 및 신호 증폭기(⑧, TM5302A)에 의하여 계측된다.

니들 구동력과 움직임은 시험장치 상단에 설치된 로드셀(④, Model 112A)과 인젝터의 니들 플런저를 연결하여 계측하였다. Table 3은 계측에 사용된 로드셀의 사양이다.

한편 각각의 입력신호와 니들 구동력 및 솔레노이드 구동전류는 컴퓨터와 스코프에 설치된

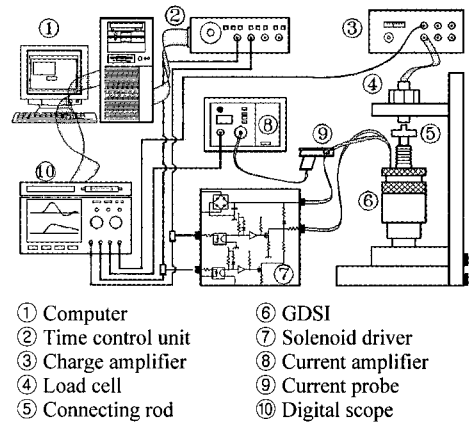


Fig. 3 Schematic diagrams of solenoid test apparatus

Table 3 Specifications of load cell

Items	Specifications
Manufacturer	PCB piezotronics
Type	Piezoelectric
Model	112A21
Dynamic range	0~19.5N
Max. range	195N
Sensitivity	53mV/N
Linearity	±1%FSO

GPIB(General Purpose Interface Bus)에 의하여 컴퓨터에 저장된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 솔레노이드 특성

일반적으로 솔레노이드 내부에서 발생하는 자기장의 세기는 코일의 감은 횟수(n)와 전류(I)에 비례하는데 만약 입력이 T_w 의 펄스(pulse) 신호라면 솔레노이드의 전류 변화는 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다.⁶⁾

$0 < t \leq T_w$ 인 경우

$$i(t) = \frac{V_o}{R} \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}} \right) \quad (2)$$

$t > T_w$ 인 경우

$$i(t) = \frac{V_o}{R} \left(e^{-\frac{Rt}{L}} - 1 \right) e^{-\frac{R(t-T_w)}{L}} \quad (3)$$

여기서 V_o , R 및 L 은 각각 공급전압, 회로의 총 저항 및 코일의 인덕턴스를 나타낸다. 한편 솔레노이드에 의한 구동력 크기는 코일에 흐르는 전류의 제곱에 비례하기 때문에 회로의 특성을 비교하기 위하여 최대전류가 같도록 하여야 한다.

이러한 이유로 분사압력 5.0MPa 조건에서 새츄레이션 구동회로에서 GDSI의 실제 구동전압과 전류값을 측정한 후, 이를 기준으로 피크-홀드의 인가전압 및 저항값을 각각 결정하였다. 그 결과 새츄레이션과 피크-홀드의 인가전압은 각각 DC13, 53V이며, 피크-홀드형의 저항 R_p 와 R_1 은 각각 5.4, 10.1Ω이다.

한편 현재 양산되고 있는 M사의 HPSI의 경우는 배터리 전압인 DC12V를 100V로 승압 변환시켜 솔레노이드에 공급하는 방식을 채택하고 있다. 이는 솔레노이드의 크기를 줄임으로써 인젝터의 크기를 소형화하면서 큰 전류를 공급할 수 있기 때문이다.⁷⁾

Fig. 4는 구동회로에 의하여 실제 솔레노이드에 흐르는 전류를 측정한 것이다. 새츄레이션 타입의 경우에는 신호가 인가된 후 전류가 비교적 완만히 증가하여 최대전류까지 도달한 후, 신호가 종료됨과 동시에 급격히 감소한다. 특히 초기

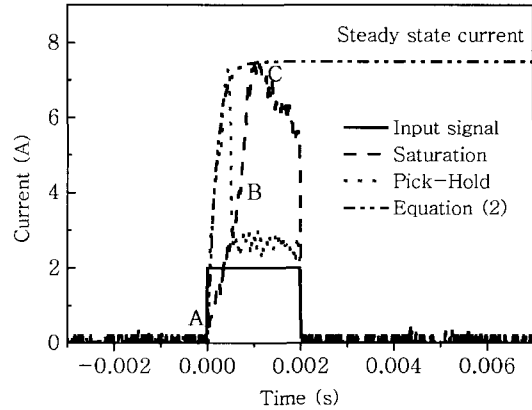


Fig. 4 Solenoid current generator by diving circuit ($T_w : 2ms, T_p : 0.5ms$)

전류상승구간에서 상승률이 다른 영역(B)이 나타난다. 이러한 현상은 플런저가 움직이기 전에 저항 및 인덕턴스에 의하여 플런저가 움직이는데 필요한 자속을 형성하는 구간과 일단 플런저가 움직이기 시작하면 자극과 플런저 사이의 공극(air gap)이 줄어들어 회로 인덕턴스 값이 변하기 때문에 나타나는 것으로 판단된다.

반면 피크-홀드의 경우는 초기 전류증가 지연은 거의 발생되지 않고 피크의 입력과 동시에 정상상태의 최대 전류까지 상승하며 피크신호가 종료되면서 일정한 유지 전류까지 하강한 후 홀드신호 종료와 동시에 전류가 소멸된다.

솔레노이드에 흐르는 전류상승률은 일반적으로 시상수(time constant)로 표시되는데 이는 정상상태 전류의 63%도달 시점까지 걸리는 시간을 의미한다. 새츄레이션의 시상수는 0.74ms이지만 피크-홀드는 0.16ms로서 피크-홀드가 새츄레이션 보다 약 78% 정도 입력신호에 대한 응답성이 빠르다.

두 경우 입력신호가 끝나면 모두 전류가 급격히 소멸됨을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 것처럼 순방향으로 다이오드를 연결하여 잔류전류를 빨리 제거하였기 때문이다.

한편 솔레노이드의 유지전류는 각각 5.7~7.3A와 2.6~3.2A로서 피크-홀드경우가 약 55% 정도 낮은 것을 알 수 있다. 따라서 발열로 인한 솔

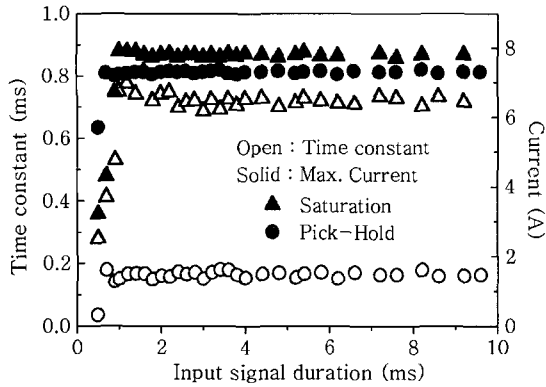


Fig. 5 Characteristics of time constant and current

레노이드의 손상 및 오 작동을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

일반적으로 GDI는 연료량에 의하여 출력을 제어하기 때문에 PFI보다 인젝터의 작동 범위가 훨씬 넓어야 된다. 이러한 이유로 Fig. 5와 같이 입력 신호를 0.5~10ms로 변화시키면서 각각 시상수와 최대 전류값을 계측하였다.

픽크-홀드형의 경우는 전체 입력신호 영역에서 시상수 및 최대 전류 값이 거의 일정하다. 그러나 새츄레이션형은 입력신호가 1.0ms 이하의 짧은 경우 비록 시상수는 작지만 니들을 개방할 수 있는 충분한 전류 값까지 도달하지 못한다. 따라서 이러한 경우 니들이 완전히 열리지 못하거나, 전혀 작동하지 않는 경우가 발생되어 정확한 제어가 곤란하다. 만약 이러한 구동회로를 GDI에 적용한다면 저부하 영역이나 고속 운전 영역에서는 사용이 불가능해지는 문제가 발생될 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 인젝터 응답특성

구동회로에 따른 인젝터의 성능을 파악하기 위하여 니들 구동력과 그에 따른 분무현상을 파악하였다.

Fig. 6은 입력 구동신호를 2ms로 인가했을 때 회로별 구동력의 변화를 나타낸 것이다. 전류의 상승 지연과 같이 입력신호가 인가된 후 니들 구동력이 작용하게 되는 기간까지 시간지연이 발

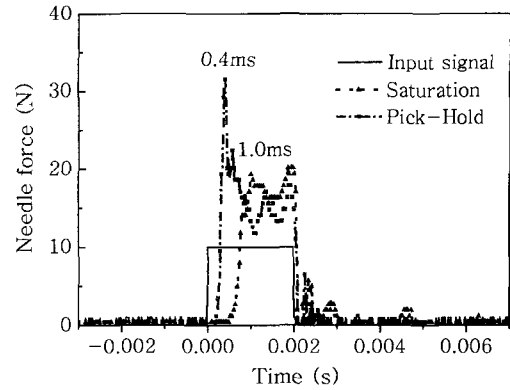


Fig. 6 Needle force generated by different diving circuit (Tw : 2ms, Tp : 0.5ms)

생되어 최대 구동력까지 도달하는 데는 1.0ms, 0.4ms가 지연되었음을 알 수 있다. 한편 니들 구동력이 작용하기 시작하여 최대가 되는 시점까지의 구동력의 비틀림률(slew rate)을 계산해보면 41.3, 151.6으로 3.7배 가량 피크-홀드형이 크게 나타났다.

입력신호에 대한 구동력의 시간변화와 실제 분무현상과의 관계를 파악하기 위하여 가시화 실험을 수행하였다. Fig. 7은 분사압력 5.0MPa, 입력신호 2.0ms인 경우 GDSI의 실제 분무현상이다.

새츄레이션의 경우에는 최고 구동력 도달 시점보다 조금 앞선 0.79ms에서 분무되기 시작하여 유지 구동력이 작용하는 기간인 2.02ms까지 분무가 성장하면서 완전한 분무로 성장하여 이후 2.38ms에서 인젝터 팁 부분에서 분무가 중단되면서 2.45ms가 되면 그 현상이 더욱 뚜렷하게 나타난다. 따라서 이 경우에는 약 1.5~1.6ms동안 분무가 이루어졌음을 알 수 있다.

반면 피크-홀드의 경우는 최고 구동력 발생 시점인 0.4ms에서 분무가 시작되어 피크신호 종료시점인 1.0ms에서는 뚜렷한 스웰 분무 형상으로 성장한 뒤 약 2.38ms에서 새츄레이션과 마찬가지로 인젝터의 팁에서 분무가 중단되기 시작하기 때문에 실제로 1.98~2.05ms동안 분무가 이루어졌음을 알 수 있다.

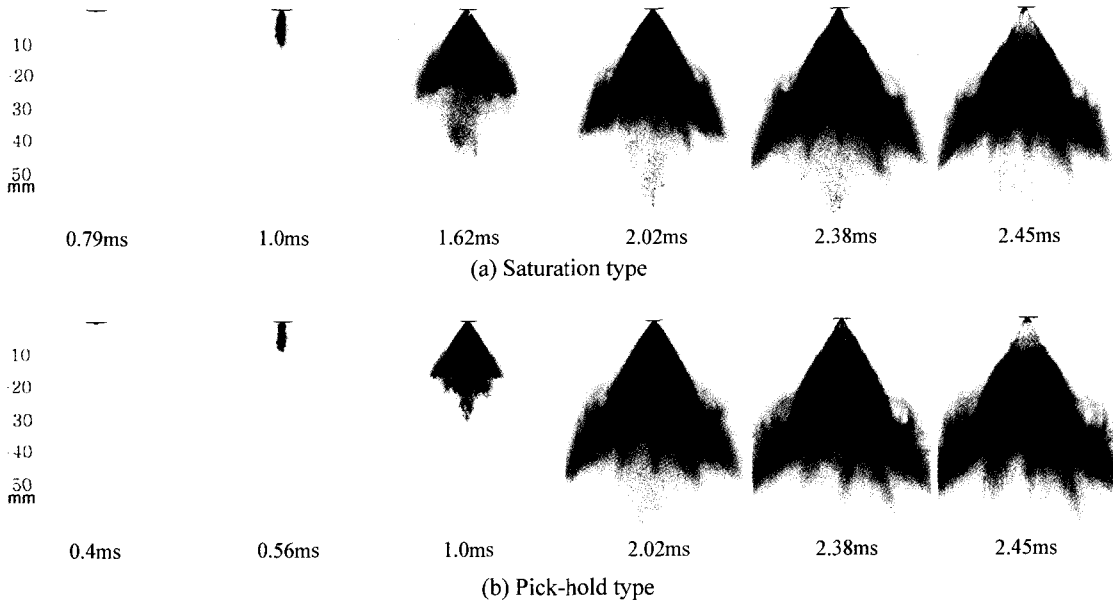


Fig. 7 Spray phenomena generated by different injector driver(signal duration : 2ms, Injection pressure 5.0MPa)

따라서 피크-홀드형은 입력 구동신호와 거의 비슷한 기간동안 실제로 분무가 이루어질 뿐만 아니라 단위 입력신호에 대한 분무도달거리도 크게 나타났다. 이러한 이유로 실제 엔진에 분사된 연료는 공기와 접촉할 수 있는 기회가 많아지기 때문에 연소현상에서도 유리하게 작용할 것으로 판단된다.

한편 운전영역을 확대할 경우 입력 신호와 실제 니들 개방기간 사이의 관계를 Fig. 8과 같이

조사하였다. 피크-홀드의 경우는 전 운전영역에서 입력신호에 대하여 거의 일정한 변화를 유지하지만 새츄레이션의 경우는 입력신호의 기간이 길어질수록 니들 개방시간의 변화율이 감소된다.

새츄레이션은 비록 최대 전류 값이 피크-홀드와 같더라도 유지전류가 많기 때문에 소비전력이 커져 입력 신호가 긴 경우는 Fig. 9와 같이 후반부에서 니들 구동력이 급격하게 감소하는 현상이 발생되기 때문이라고 판단된다. 만약 3.1절

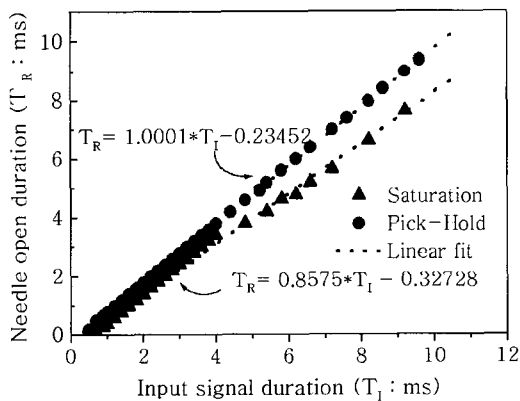


Fig. 8 Relationship between input signal duration and needle open duration

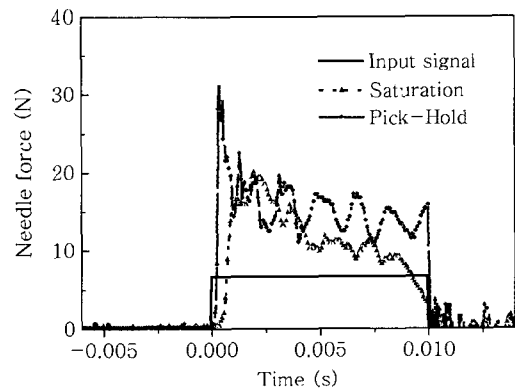


Fig. 9 Variation of needle force in the long input signal

에서 언급한 구동회로의 인가전압을 높게 한다면 이러한 현상은 막을 수 있지만 이 경우 슬레노이드에 흐르는 전류가 증가되어 슬레노이드 내부 발열 및 높은 역 기전력에 의한 다른 문제가 발생할 수 있을 뿐만 아니라 실제 엔진 적용 시 불필요한 전력소비를 유발시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 유량특성

Fig. 10은 구동회로별 각 분사기간에 대한 유량특성을 서로 비교한 것이다. 유량은 각 입력신호에 대하여 20~50회 분사한량을 전자저울로 측정 후 이를 평균하였다.

두 경우 시간에 대하여 유량은 Fig. 8과 같이 전체적으로 선형적으로 증가되지만 입력신호가 1.2ms 이하의 짧은 경우, 새츄레이션형은 거의 변화 없이 일정하지만 피크-홀드는 모든 영역에서 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 5에서 설명한 것처럼 입력신호가 짧은 경우 새츄레이션형은 니들이 완전히 열리기 전에 신호가 끝나기 때문이다. 또한 분사기간이 길어지면 두 회로에 의한 유량의 차이는 더욱 증가된다. 이는 Fig. 8과 9에서 설명된바와 같이 입력신호가 길어질수록 새츄레이션의 경우 유지력이 작아지기 때문이다.

한편, GDI 인젝터는 높은 회전수에서도 짧은 분사기간동안 전부하(full load)를 유지하기 위

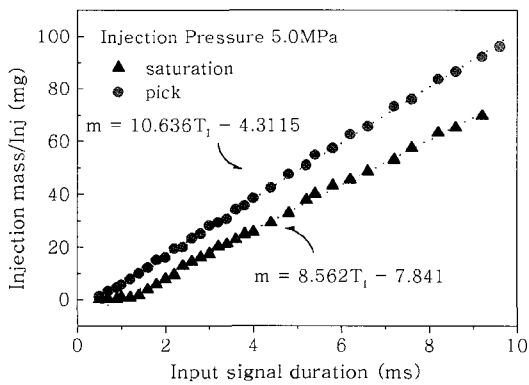


Fig. 10 Dynamic flowrate characteristics

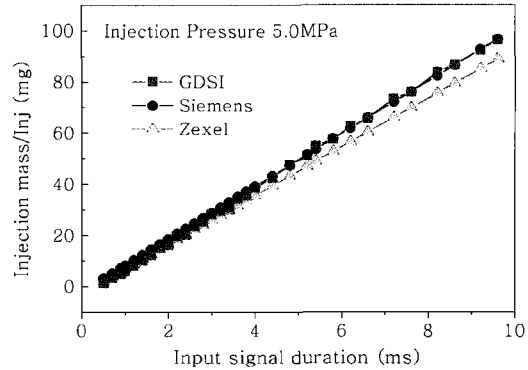


Fig. 11 Comparison of flowrate between GDSI and other type GDI injector

해서는 충분히 큰 정적유량을 확보해야만 한다. Fig. 11에 나타난바와 같이 GDSI는 이미 양산되고 있는 것과 비교해도 큰 차이가 나지 않음을 명확히 알 수 있다. 이것으로부터 GDSI의 노즐형상 및 구동회로 설계가 적절하다고 판단할 수 있다.

4. 결론

GDI 엔진용 인젝터로 개발된 직접분사식 가솔린 선회 분사기의 응답성을 파악하기 위하여 서로 다른 특성의 구동회로를 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 피크 홀드형 구동회로의 인가전압은 53DCV, 피크 전류와 홀드 전류의 크기를 결정하는 저항인 R_p 와 R_1 은 각각 5.4, 10.1Ω으로 고정된 상태에서 전류 증가 시상수는 0.16ms로서 새츄레이션형에 비하여 약 78% 우수하게 나타났다.

2) 피크-홀드형의 경우는 입력 신호에 대하여 $t_R = 1.000T_1 - 0.234$ 의 관계로 실제 니들이 작동하며, 이때 유량은 $m = 10.63T_1 - 4.31$ (g/s)로서 선형적인 관계뿐만 아니라 타사의 정적유량과 거의 일치한다.

본 연구를 통하여 살펴본 바와 같이 인젝터 구동회로는 분무특성 및 유량에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 직접분사식 가솔린 선회 분사기의 응답성은 비교적 우수하지만 실제

엔진 적용에 앞서 그 형상을 최적화 할 필요가 있다고 판단된다. 따라서 솔레노이드의 암페어 턴은 현재 상태로 유지하면서, 즉 공급 전류는 증가시키고 코일의 감김 수는 줄이면 소형화할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) N. A. Chigier, "Progress in Energy and Combustion Science," Vol.25, No.5, pp.441-444, 1995.
- 2) 박용국, 이충원, "직접분사식 가솔린 선회 분사기개발에 관한 연구," 대한 기계학회지, 제 25권 제1호, pp.78-86, 2001.
- 3) 구기준 외 공역, "전자기학," 회중당, p.167, 1998.
- 4) 이형승, 김한조, 김응서, "솔레노이드 구동수 소인젝터의 성능특성," 자동차공학회 논문집, 제5권 제1호, pp.174-185, 1997.
- 5) R. K. Green, N. D. Glasson, "High-Pressure Hydrogen Injection for Internal Combustion Engines," Int. J. Hydrogen Energy, Vol.17, No.11, pp.895-901, 1992.
- 6) 정원섭 외 공역, "회로이론의 기초와 응용 2nd," 대웅, pp.408-413, 1996.
- 7) 瀬名智和, "エンジン技術の過去現在未來," グランプリ出版, p.147, 1997.
- 8) Sears, Zemansky, Young, University Physics 7th ed., p.774, 1987.