

<논 문> SAE NO. 96370021

솔레노이드를 사용한 정압 연료분사 장치의 제어에 관한 연구

A Study on the Control of a Constant Pressure Fuel Injection System Using Solenoid

윤 수 한,* 이 중 순,** 김 현 지,** 배 중 용,** 하 중 료***
S. H. Yoon, J. S. Lee, H. J. Kim, J. Y. Bae, J. Y. Ha

ABSTRACT

For the practical use of a fuel injection system using solenoid, some mechanical and electrical problems should be explicitly analyzed. In our study, we have investigated these problems experimentally and have improved such that a solenoid driving circuit is liable to establish a fast reponse and a precise control of injection quantity. This proposed fuel injecton system is capable to control equivalence ratio from low level to high level. Therefore, we expect that this proposed system should be applicable to an actual engine.

주요기술용어 : Solenoid driving circuit(솔레노이드 구동회로), Injection pressure(분사압력), Peak force(흡인력), Holding force(유지력), Atomization characteristics(분무특성)

기 호 설 명

- | | | | |
|---|----------------------------|----------------|--|
| A | : 흡인표면적(m ²) | N | : 코일을 감은 수 |
| B | : 자속밀도(Wb/m ²) | Pa | : 공급공기 초기압력(MPa) |
| F | : 힘(N) | Pi | : 연료 분사압력(MPa) |
| i | : 전류(A) | Q | : 연료 분사량(mm ³) |
| L | : 코일 인덕턴스(H) | R | : 코일 저항(Ω) |
| l | : 공극의 거리(m) | t | : 시간(ms) |
| | | Ta | : 공급공기 초기온도(K) |
| | | μ ₀ | : 투자율(4π × 10 ⁻⁷ Wb/Ampere-meter) |

* 정회원, 동명전문대학
** 정회원, 동아대 대학원
*** 정회원, 동아대학교

1. 서 론

최근 자동차 소음과 배기가스의 유해 배출물

저감에 대한 규제가 날로 엄격해짐에 따라, 세계 각국에서는 이에 대한 대응책의 마련을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 디젤기관은 출력력을 개선시키거나 저당량비로 연소시키더라도 소음과 배기에 대해 강화되어 가고 있는 규제에 당면하게 될 것이다¹⁾. 이에 따라, 대체 연료 사용에 대한 중요성이 새롭게 대두되고 있고, 배기가스 성분의 개선을 위한 연료 분사의 압력, 분사형태, 분사방법 및 분사 노즐 등에 대한 연구들이 활발한 실정이다^{2)~5)}.

현재까지 디젤기관에서는 연료 분사 펌프에 의해 분사되는 기계적 시스템이 주로 이용되고 있으나 분사량, 분사형태, 분사 시기 등의 조절에는 정확도에서 한계성이 있다. H. Kano 등⁶⁾은 배기가스 성분 개선을 위해서는 연료분사압을 고압으로 높여야 한다고 보고하고 있으며, M. Okajima 등⁷⁾은 분사형태 조절에 의해 무화과 공기 이용율은 향상되지만, 초고압 분사에서는 분사 형태 조절이 어렵다고 보고하고 있다.

그러나 최근에는 기계적 분사 기구를 전자적으로 제어한 유니트 인젝터 및 펌프 시스템으로 120~150MPa의 초고압 분사가 가능한 분사기구를 개발하여 실험한 결과 G. Stumpp 등⁸⁾과 K. Oblander 등⁹⁾은 유니트 인젝터가 고압, 고속일수록 소음과 유해배출물, 특히 그을음(soot)이 감소되고 15% 정도의 연료절감 및 미연탄화수소가 급격히 감소되었으며, 분사 시기 지연에 의해 NO_x도 허용 기준량까지는 저하시킬 수 있는 것으로 보고하고 있다. 한편 디젤기관의 분사기구에서 솔레노이드를 직접 액추에이터로 이용하여 천연가스를 분사시키는 장치가 개발되어 그 결과는 매우 실용 가능성이 있는 것으로 보고되고 있다.^{11),12)}

지금까지 내연 기관에 대한 전자식 연료 분사기구로서 솔레노이드가 구동인젝터로 사용된 것은 주로 가솔린 기관이었다. 그러나, 디젤기관에서 적용이 거의 되지 못하는 이유중의 하나는 안정된 상태나 아닌 연소실에 극히 짧은 시간에 정확하게 조절된 연료가 분사되어야 하며, 이를 위해서는 디젤 인젝터가 초고속으로 작동되어야 하기 때문이다. 또한 솔레노이드를 직접분사기구로

실용화 시키기 위해서는 기계적 작동, 유압 전파, 자기적 변화 등의 기계적·전기적 문제가 선결되어야 하는데, 이들은 서로 복합적이거나 상호관계에 있다. 따라서, 이들의 영향을 규명하고 개선시킬 필요가 있다.

본 연구에서는 이와 같은 문제점들에 대한 개선 방법을 규명하여 정압에서 액체연료 분사시 솔레노이드의 급속구동에 의한 고응답성, 분사량 제어, 제어의 고속화, 소량 분사 영역에서의 분사량 정밀도, 분사 형태의 재현성 등을 확립하기 위한 솔레노이드 구동회로 및 계측 장치를 개발하여 저 당량비영역에서 고 당량비까지 제어할 수 있도록 하여 실험을 행하고, 그 결과를 실기관에의 적용 가능성을 구명(究明)함을 그 목적으로 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 설계요인

연료분사량은 분사압력, 분사기간, 니들리프트 등에 의해 변하므로, 분사밸브의 개폐시간은 펄스폭 조절에 의해 가능한 빠른 응답이 요구된다. 또, 정확한 분사량 제어, 분사기간 변화에 의한 부하조절, 2차 분사 또는 후적이 없이 급속한 개폐 등이 용이해야 한다.

솔레노이드에 의해 주어진 단면적에 작용되는 최대흡인력은 코어 및 아마추어 재질의 자화도에 의해 결정되므로¹²⁾ 최대흡인력은 단면적에 비례하며, 아마추어의 가속도는 그 질량과 작용된 힘에 관계된다. 따라서, 아마추어의 질량이 증가하면 가속도가 작아져 응답성이 늦어진다. 아마추어와 코어는 전류가 제거된 후 전류자기의 지속시간이 짧아야 하므로, 재질로서는 주로 열처리된 연강이 쓰인다.

또한, 필요한 총 작용력을 얻기 위해서는 설계값에서 사용해야 하는 이론적 흡인력보다 약 3.3배 이상의 효율을 가진 것을 사용해야 한다¹³⁾. 솔레노이드에 의해 유기되는 최대 이론 흡인력은 다음식과 같다¹⁴⁾.

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (1)$$

연강에서 자장포화가 약 1.7테스라(tesla)에서 발생한다고 하면 이론적인 작용력을 얻기 위해 필요한 코어의 면적을 (1)식에서 구할 수 있다. 자장포화를 얻기 위해 필요한 암페어-턴(ampere-turn)의 개략적인 값은 다음식에서 구할 수 있다.

$$N \cdot i = \frac{Bl}{\mu_0} \quad (2)$$

필요한 초기 전압은 다음식으로 구해진다.

$$V = L \frac{di}{dt} + i(t)R \quad (3)$$

식 (2)에서 B를 구하여 식 (1)에 대입하면 솔레노이드에 가해지는 힘(F)는 i^2 에 비례한다. 여기서 i 가 가능한 한 빨리 증가되어야 한다. 식 (3)은 주어진 인덕턴스에 대해 전류의 증가 비율이 인가된 전압에 직선적으로 비례하므로 힘의 초기 증가율과 응답 시간은 전압이 증가할수록 개선된다.

2.2 구동장치

Fig.1은 솔레노이드 구동 회로의 개략도이다.

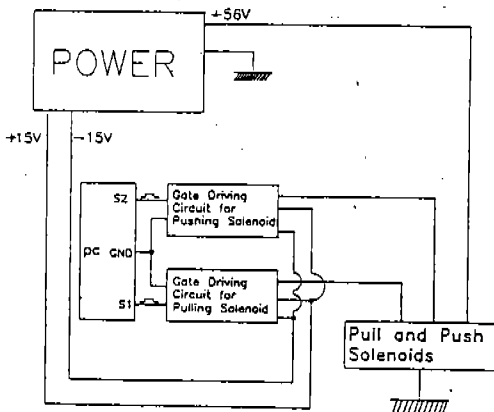


Fig.1 Schematic diagram of a solenoid circuit

회로는 정전압 공급장치부, 펄스입력부, 베이스 드라이브부, 동작부, 역전압제어부 등으로 구성되어 있다. 컴퓨터(PC)로부터의 신호가 인가되면 펄스기간동안 FET를 동작시켜 솔레노이드를 구동시킨다.

Fig.2는 솔레노이드가 부착된 연료분사장치이다. 분사노즐의 구경은 1.0mm의 핀틀형으로서 기존 제품을 사용하였다. 스프링들은 좌굴하중을 고려하여 SNCM 21종을 침탄처리하였고, 솔레노이드 케이스는 비자성체인 황동으로 제작하였다.

솔레노이드는 설계요인에 의한 계산과 실험조건을 감안하여 7SF(Lucas Co.)를 선택하였다. 제품특성은 코일권수 780, 저항 8.09Ω, 암페어 턴 5000, 56VDC, 350W, 10% duty cycle이다.

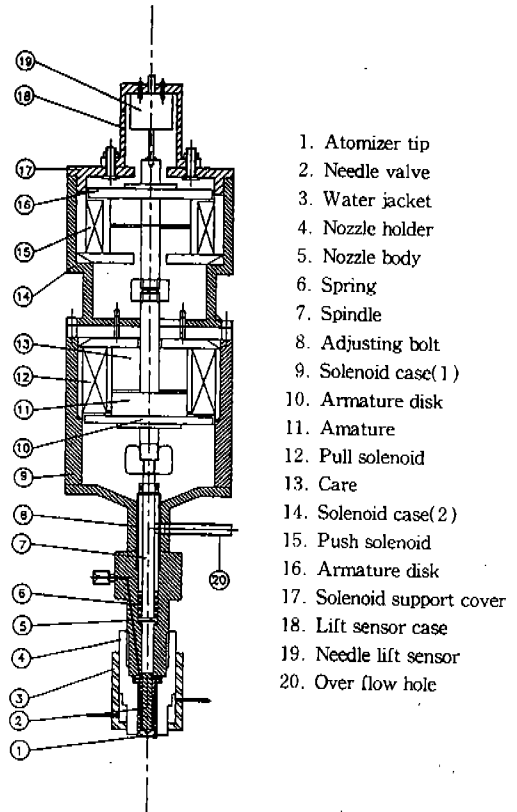


Fig.2 Schematic diagram of injection device with solenoid

2.3 실험방법

연료분사 장치의 니들밸브 동특성을 측정하기 위해 가변저항식 리프트 센서를 솔레노이드 상단에 설치하였다. 또, 노즐에서 분사되는 연료는 포토커플러를 노즐 선단부에 장착하여, 분무의 정성적인 경향을 측정할 수 있도록 하였다.

Fig.3은 실험장치의 전체 개요를 나타내고 있다. 실험장치는 연료공급 및 정압유지부, 솔레노이드 구동부, 계측부(니들양정, 분무형상, 분사량)등으로 이루어져 있다.

고압 질소가스에 의해 어큐뮬레이터 내의 연료는 정압을 유지하며 분사노즐까지 연결된다. 분사노즐 홀더 내의 복귀스프링에 의해 닫혀있는 니들밸브는 Pull 솔레노이드에 의해 스펀들이 상승된다. 이 때, 니들밸브는 솔레노이드의 작동시간에 의해 설정양정(최대 0.55mm) 까지 밀어 올려져 1회의 설정연료가 분사되며, 이 후 압력스프링 또는, 압력스프링과 Push 솔레노이드의 합력에 의해 닫힌다.

어큐뮬레이터에 의해 일정압력으로 분사되는 분사압력 조건은 7.84MPa에서 12.74MPa까지 0.98MPa의 중간격으로 하였고, 분사노즐의 설정압력과 어큐뮬레이터의 연료압력과의 차이(이하 ΔP 로 함)를 4.9MPa, 6.86MPa, 8.82MPa, 10.78MPa, 11.76MPa로 변화시켜 분무특성과 니들밸브의 닫힘시간, 분무시간에 대해 관찰하였다.

또, 스프링 상수가 큰 동피치와 상수가 작은 부동피치의 스프링을 사용하여 스프링 형상에 따른 기계적 특성과 진동에 미치는 영향에 대해 관찰하였다. 사용연료는 메탄올(순도 99.99% 이상)을 사용하여 대기압 상태에서 분사시켰으며, 50~100회 분사량의 평균값을 취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

PC로부터 인가되는 펄스폭에 따른 선형적인 연료분사량 변화와 바람직한 분무형태를 얻기 위해서는 니들밸브가 급속히 개폐되어야 한다. 따라서, 빠른 응답성을 얻기 위해 용량성 방전 구동방식을 사용하였고, 솔레노이드의 구동을 위해 FET가 동작을 할 때, 식 (3)에서와 같이 큰 역전압이 코일의 인덕턴스에 의해 걸리게 되며, 이에 의해 잔류 자기력이 오래 지속되면 니들밸브의 하강속도가 늦어지거나, 2차분사, 후적 등이 발생하여 정확한 유량 및 시간 제어가 불가능하게 된다. 이를 해결하기 위해서는 전자구동회로의 개선과 기계적인 개선이 필요하다. 이를 위해, 다음과 같은 방법들로 개선책을 찾고 이에 대한 문제점을 고찰한다.

3.1 Pull 솔레노이드와 Push 솔레노이드 사용

Fig.4는 Pull솔레노이드에 인가된 펄스의 OFF시 발생하는 잔류자기의 영향을 줄이기 위

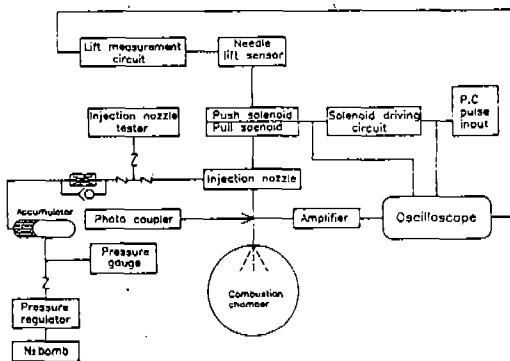


Fig.3 Overall schematic diagram of a fuel injection system

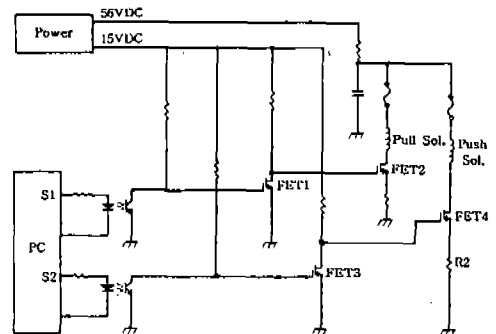


Fig.4 Capacitive discharge pull solenoid and push solenoid driver circuit

해 Push 솔레노이드를 사용한 경우의 구동회로도이다. 회로에서 FET 1과 FET 2는 Pull 솔레노이드를, FET 3, FET 4는 Push 솔레노이드를 ON/OFF시키기 위한 것이다.

이 때, 솔레노이드의 작동을 위한 56VDC의 전압은 축전기에 충전시킨 후, PC로부터 제어된 펄스폭만큼 공급된다. PC로부터 S1에 솔레노이드 구동용 펄스가 인가되는 동안 Pull 솔레노이드가 동작되고, 또, S2에 솔레노이드 구동용 펄스가 인가되는 동안 Push 솔레노이드가 작동하게 된다.

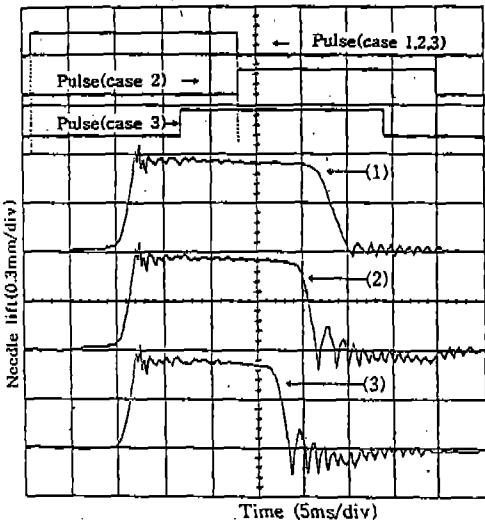


Fig.5 Relations between time and needle lift

Pull 솔레노이드의 동작이 완료될 때, 솔레노이드에는 높은 역기전력이 유기되는데, 이 역기전력의 영향을 배제하기 위하여 PC에서 Push 솔레노이드를 구동시키기 위한 펄스 S2가 출력된다. 결국 Pull 솔레노이드에 남아있는 잔류자속에 의해 니들밸브가 계속 들려 있거나 완만하게 닫히는 상태를 Push 솔레노이드에 의해 급속히 닫히게 한다.

Fig.5는 펄스폭 22ms에서의 니들리프트를 나타낸 것이다. 그림에서 (1)은 Pull 솔레노이드만 작동시킨 경우로 강한 잔류자속에 의해 분사기간도 길고, 니들의 하강속도도 완만한 상태를 나타낸다. (2)는 Pull 솔레노이드에 인가한 펄스가 OFF되는 순간에 Push 솔레노이드에 펄스를 인가한 경우로, 분사기간도 짧아지며 하강도 급격하게 이루어지는 상태를 보인다. 한편 (3)은 Push 솔레노이드 구동지연시간을 고려하여 S1이 종료되기 6ms전에 S2를 인가한 경우로서, 인가된 펄스폭에 대한 분사기간도 정상적으로 되고, 니들리프트의 하강도 더욱 급격하게 이루어지는 것을 보이고 있다.

3.2 흡인력과 유지력의 사용

Fig.6은 Pull 솔레노이드만을 사용하는 경우의 회로이다. 솔레노이드의 당기는 힘은 아마추어와 코일코어 사이의 공극에 비례하므로, 초기전류(흡입전류) 56VDC로 충분히 공급하여 아마추어를 당기고, 공극이 감소되면 유지력에 필요한 전류만 공급하기 위해 PC로부터의 S2 신호로 FET3을 차단시켜 축전기로부터의 공급전류를

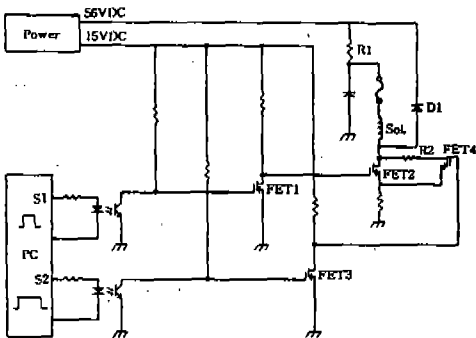


Fig.6 The circuit of applying peak current and holding current

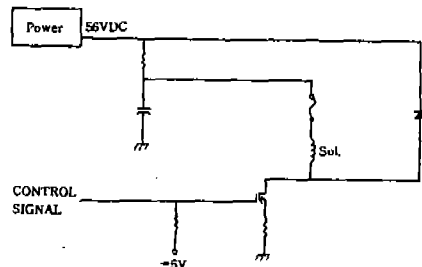


Fig.7 The circuit of applying a reverse bias to gate

저항 R2를 통과하게 하므로써, 유지력에 필요한 전류(유지전류)만이 축전기로부터 공급되도록 한다. 여기서, 유지전류의 크기를 최소화하는 이유는 펄스 종료시 di/dt의 크기를 최소화하기 위한 것이다.

3.3 부(-)전압 인가

일반적으로 PN 접합의 접합부에서는 P형 영역의 정공과 N형 영역의 전자가 재결합하여 소멸하기 때문에, 전위장벽이 생겨 전류가 흘러 나가는 것을 방해하는 역할을 한다. 따라서, FET의 OFF 시간을 보다 신속히 해 주기 위해서는 게이트에 축적된 전하를 빠른 시간 내에 방전시켜야 하는데, 이를 위해 -5V전압을 게이트 단자에 인가한 경우를 Fig.7에 나타낸다.

Fig.8은 분사압 7.84MPa, ΔP 10.78MPa로 하고 30ms의 펄스를 인가한 경우이다. 흡인력과 유지력을 가지고 FET 게이트에 -5V를 인가한 결과, 유지전류 종료시의 역기전력 발생시간이 무시될 수 있을 만큼 짧은 시간에 하강되었고, 포토커플러의 출력으로 판단하는 연료 분사 형태도 미세한 후적 등을 나타내어 바람직하였으며, 니들 리프트도 급속한 복귀 경향을 보이고 있다.

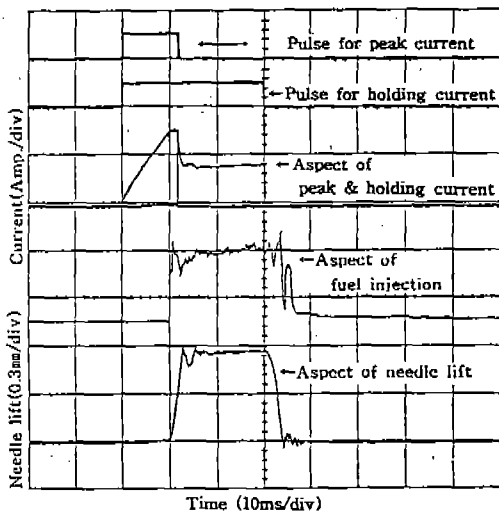


Fig.8 Characteristics of current, injection and needle lift(at needle lift 0.55mm)

3.4 기계적 문제

Fig.9(a, b)에 최대양정 0.55mm, 펄스폭 20ms인 경우에 ΔP의 변화에 따른 연료분무 형태와 니들리프트의 동특성을 나타낸다. ΔP를 변화시킨 결과, 차이가 적은 경우 니들밸브의 밸브 시트에 대한 밀착력이 작아 후적이 발생할 가능성이 많고 솔레노이드의 잔류자속에 의해 분사시간이 길어지고, 니들밸브의 복귀도 완만한 경향을 보였다. 한편, ΔP가 큰 경우 펄스인가에 대한 니들밸브 열림 지연 시간은 길어지거나 공급 전압을 높이면 보상이 되고, 니들리프트의 상승도 빨라짐은 물론, 니들의 복귀시간도 급속히 빨라

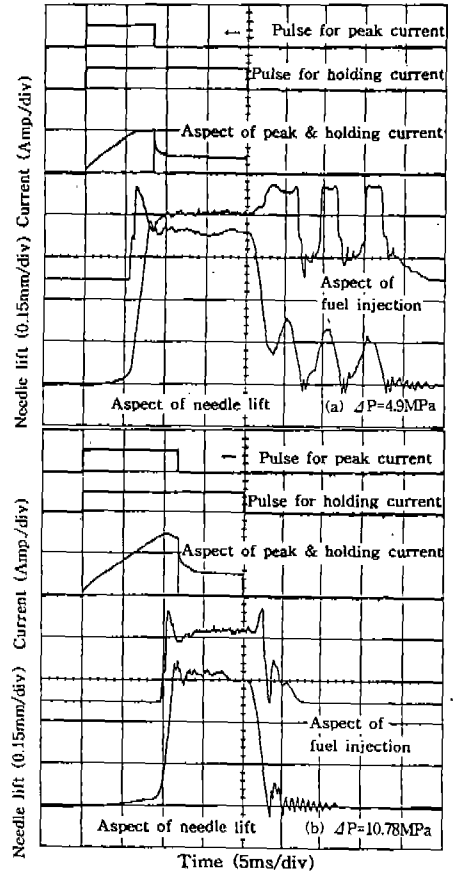


Fig.9 Characteristics of current, injection and needle lift(at pulse width 20ms, injection pressure 10.78MPa ΔP=4.9MPa, 10.78MPa, needle lift 0.55mm)

저 연료의 공급과 차단에 소요되는 시간이 짧아지는 경향을 볼 수 있다. 그러나 복귀시간이 짧을수록 스프링의 진동과 잔류자속에 의해 2차 분사가 발생하는 경향이 있지만 유지전류를 알맞게 인가하면 이러한 경향은 최소화되며, 니들리프트를 0.3mm로 한 결과, 후적도 감소함을 확인하였다.

또, 장력 조절용 스프링의 경우 스프링 상수가 클수록 니들밸브를 상승시키는데 큰 힘이 필요하고 복귀는 빠르지만 등피치인 경우 진동의 영향이 커서 양호한 분무가 형성되지 못하고 2차 분사 및 후적 발생의 빈도가 높다. 스프링 상수가 작고 부등피치인 경우 니들상승은 더욱 빨라지고, 복귀는 약간 지연되나 장력을 크게 하면 보상되며 진동을 급속히 감소 시킴으로 후적을 최소화할 수 있다.

3.5 분무특성

Fig.10은 분사압력 11.76MPa, ΔP 가 11.76MPa인 조건에서 부등피치 스프링을 사용한 경우 펄스폭과 분사 기간의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에서 흡인전류만 인가한 경우, 분사기간이 비선형적으로 더욱 길어지는 반면, 흡인

전류와 유지전류를 동시에 인가한 경우는 양호한 선형성을 보인다. 펄스폭이 짧은 곳에서 약간의 곡선을 나타낸 것을 니들밸브가 상승중에 있는 영역이다.

Fig.11은 분사압력 7.84MPa, ΔP 가 10.78MPa인 경우, 분사기간과 연료분사량의 상관관계를 나타낸 것이다. 흡인전류만을 계속 공급하는 경우와 Pull 솔레노이드와 Push 솔레노이드를 동시에 사용한 경우, 모두 분사기간에 따른 연료 분사량은 거의 선형성을 보이지만, 특히 흡인, 유지전류와 -5V를 인가한 경우가 가장 양호한 선형성을 보인다. 분사량과 분사기간의 관계가 선형성을 유지하면서 구배가 가장 큰 것은 단위시간당의 연료분사량이 많은 것을 의미하며 이는, 분무특성이 양호하기 때문으로 생각된다.

Fig.12는 ΔP 가 10.78MPa인 경우에 니들밸브가 상승하는 저부하 영역에서의 분사기간과 분사량과의 관계를 나타낸 것이다. 분사기간과 연료분사량은 일정기간까지 지수함수적인 경향을 보이고, 그 이후 곡선 구간은 스프링의 복귀시 진동에 의해 약간의 후적이 발생함에 따른 영향인 것으로 판단된다. 이 때, 직선구간은 식 (4)와 같은 실험식으로 표현할 수 있고, 오차 범위

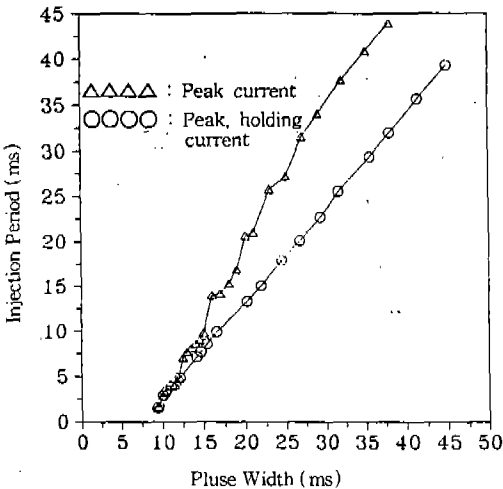


Fig.10 Relations between pulse width and injection period(at injection pressure 11.76MPa $\Delta P=11.76$ MPa, needle lift 0.3mm)

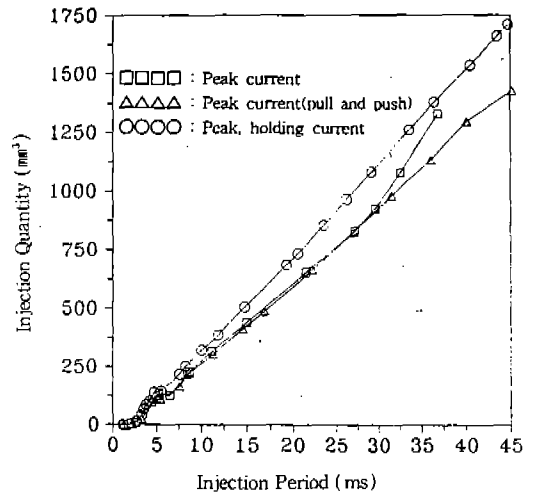


Fig.11 Relations between injection period and injection quantity(at injection pressure 7.84MPa, $\Delta P=10.78$ MPa, needle lift 0.3mm)

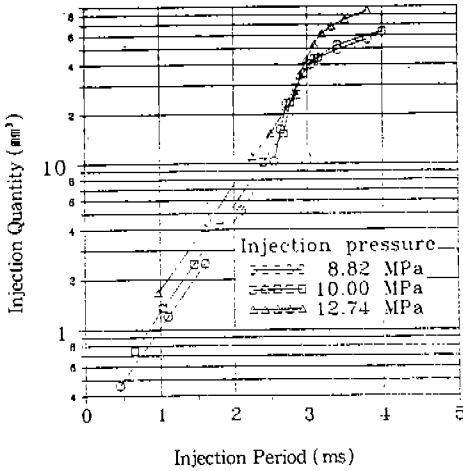


Fig.12 Relations between low injection period and injection quantity ($\Delta P=10.78\text{MPa}$, needle lift 0.3mm)

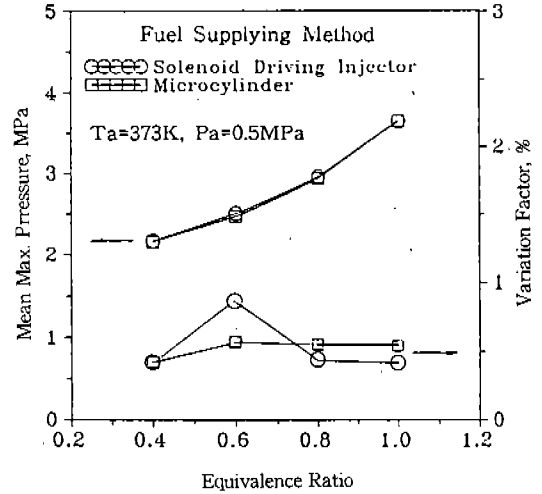


Fig.13 Relations between mean maximum pressure and variation factor on each equivalence ratio ($\Delta P=10.78\text{MPa}$, needle lift 0.3mm)

는 3% 이내임을 확인하였다.

$$Q = (0.000380583P_i - 0.010183) \exp(1.48t) \quad (4)$$

Fig.13은 연료분사제어의 정확성과 재현성을 확인하기 위하여, 부실식 정적연소기에 메탄올을 마이크로실린저(50mm³, 최소눈금 0.5mm³)로서, 정밀계량하여 공급한 경우와 솔레노이드가 장착된 연료분사장치를 이용하여 PC 제어분사한 경우에 균일예혼합기의 각 당량비에 대한 최고연소압력의 평균값과 변동계수를 나타낸 것이다. 공급기의 초기온도(T_a) 353K, 초기압력(P_a)이 0.5MPa인 경우에 대해 각 조건 모두 균일예혼합기를 형성시킨 후 10회의 연소실험을 행하였다. 그 결과, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 최고연소압력의 평균값은 각 당량비 조건에서 거의 일치하며, 변동계수는 0.4~0.9%의 범위로 매우 작은 불균류를 보이고 있다. 이로 볼 때, 본 장치를 이용한 연료분사량의 제어는 매우 정확하며, 재현성도 양호한 것으로 판단된다.

4. 결 론

솔레노이드를 사용한 연료분사장치의 분사를 정확하게 제어하기 위해 기계적, 전기적 특성이 미치는 영향을 파악하고, 이를 개선시키기 위해 급속구동, 고응답성, 분사량제어, 분사형태의 개선 및 재현성 등을 파악하여 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 솔레노이드의 통전방법 개선으로 니들밸브의 구동형태는 양호한 특성을 나타내었다.
- 2) 펄스폭에 대한 분사시간, 분사량의 관계는 흡인전류, 유지전류 및 -5V를 FET의 게이트에 인가하여 제어한 경우가 가장 선형적인 관계를 보였고, 분사형태도 가장 양호하였다.
- 3) 결과 2)의 경우 분사량의 재현성이 양호하며, 변동계수도 아주 낮은 값을 보였다.
- 4) 공기의 온도 및 압력에 따른 팽범위한 분위기 조건에서도 저 당량비에 고 당량비까지 분사량 제어가 가능하고, 노즐 크기, 형태변화에 의해 실용엔진에 적용 가능한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단에서 지원하는 핵심전문연구(941-1000-050-2) 과제의 일환으로 수행하여 얻은 결과의 일부로 관계자에게 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Minggao Yang and Spencer C. Soreson, "Modelling of the Dynamic Processes in an Electronic Diesel Fuel Injection System", SAE Transaction No.920240
2. Jeff Kotowski, Alex Korol, Mary Bellemare, John Parry, and Rich Davis, "Control of Sequential Fuel Injection and Distributorless Ignition for Modern SI Engines", SAE Transaction No.930854, 1993.
3. Michael M. Schechter, Eugene H. Jary, Michael B. Levin, "High Speed Fuel Injection System for 2-Stroke D. I. Gasoline Engine", SAE Transaction No.910666, 1991.
4. Thomas W. Ryan, Timothy J. Collahan, "Duel Fuel Injection Nozzle for Methanol Fueled Compression Ignition Engine Operation", SAE Transaction No.912357
5. Nikolaus Simon, Stefan Arndt, and Ewald Ziegler, "Experimental Measurement Techniques to Optimize Design of Gasoline Injection Valves", SAE Transaction No.920520, 1992
6. Hiroyuki Kano, Masaaki Kato, Terutada Kojima and Makoto Katagiri, "Contribution of Optimum Design for Nozzle Configuration to Spray Formation", SAE Transaction No.900824, 1990.
7. Masahiro Okajima, Massaki Kato, Hiroyuki Kano, Shigeki Tojo, Makoto Katagiri, "Contribution of Optimum Nozzle Design to Injection Rate Control", SAE Transaction No.910185, 1991.
8. Gerhard Stumpp, Wilhelm Polach, N. Muller and J. Warga, "Fuel-injection Equipment for Heavy Duty Diesel Engines for U. S. 1991/1994 Emission Limits", SAE Transaction No.890851, 1989.
9. Kurt Oblaender, Karl Kollmann, Michael Kraemer and Immanuel Kutschera, "The Influence of High Pressure Fuel Injection on Performance and Exhaust Emissions of High Speed Direct Injection Diesel Engine", SAE Transaction No.890438, 1989.
10. D. Miele, T. Krepec and T. Giannacopoulos, "Electronic Injection System for Natural Gas in a Diesel Engine Development and Testing", SAE Paper No. 890852, 1989.
11. H. Hong, T. Krepeck, R. M. H Cheng, "Optimization of Electronically Controlled Injectors for Direct Injection of Natural Gas in Diesel Engines", SAE Transaction No.930928, 1993.
12. A. H. Seilly, "Helenoid Actuators-A New Concept in Extremely Fast Acting Solenoids", SAE Paper No.790119, 1979.
13. William G. Wolber, "An Overview of Automotive Control Actuators", SAE Transaction No.840306, 1984.
14. R. J. Smith, "Circuit Devices and Systems", Fourth Edition, John Willy and Sons, New York, pp.636~640, 1984.