

# 승용차용 HSDI 디젤엔진용 Common Rail Injection System 개발

Development of Common Rail Injection System for HSDI Diesel Engine for Passenger Car



이 재 기 · 두원정공 수석연구원

Lee Jae Ki · Doowon Precision Industry Co., Ltd

## 1. 서론

환경 보호와 천연 자원의 부족에 대한 문제가 대두되면서 이에 대한 연구가 전세계적으로 진행되고 있다. 따라서 자동차 업계에서는 배기가스 저감과 연료소비 경제성 등에 대한 집중적인 관심과 노력을 기울이고 있다.

특히 화석 연료를 동력원으로 사용하며, NO<sub>x</sub>와 PM 등의 유해 배기가스와 심한 소음이 발생하는 디젤 차량 연구에 초점을 맞추고 있으며 FIE (Fuel Injection Equipment), DPF (Diesel Particulate Filter), EGR (Exhaust Gas Recirculation)과 같은 분사계 기술 및 후처리 기술을 도입하고 있다.

이중 디젤 차량의 핵심 부품인 FIE는 1980년대 DI (Direct Injection) 기술의 출현으로 소형 차량에 적용되어 연료소비 저하와 Power 집중 효과를 가져왔으나 지속적으로 환경 규제와 소음에 대한 요구는 만족시키지 못하였다. 이러한 기술적 흐름은 전자화 및 고압화 기술의 접목을 가져왔으며 Common Rail Injection System이라는 신기술의 연료분사 장치에 의해 개선될 수 있었다.

Common Rail Injection System은 엔진 회전

에 독립적으로 분사시기, 분사기간, 분사압력, 분사량 등의 분사특성에 영향을 주는 Parameter에 대한 변경과 개선이 용이하다. 최대 분사압을 1,300~1,500bar로 하여 최대 Power를 향상시킬 수 있으며 분사압 향상을 위해 Nozzle의 분공을 작게 하는 시도도 진행되고 있다. 또한 Pilot 분사를 수행하여 연소소음 및 NO<sub>x</sub>저감의 효과적인 감소가 가능하며 전자화를 통한 엔진 저속 구간에서의 Torque 향상이 가능한 System이며 초기 분사량을 감소시킴으로 NO<sub>x</sub>가 감소된다. 이러한 FIE 시스템의 상용 기술로써는 고압화에 따른 누유 문제해결과 전자화 기술을 적용하기 위한 Solenoid Valve 및 제어로직 기술의 확보가 필요하다.<sup>1-3)</sup>

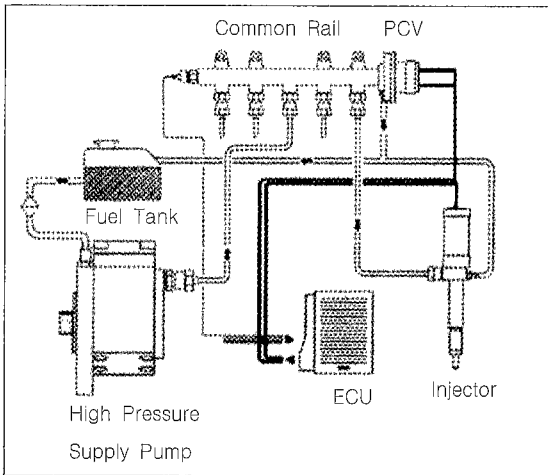
본 연구에서는 Common Rail Injection System의 설계와 이에 대한 성능실험 결과에 대하여 분석하였고 AMESim 소프트웨어를 이용하여 Common Rail의 압력제어 거동에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2. Common Rail Injection System 설계

### 2.1 System Description

Common Rail Injection System은 다음과 같은 요소로 구성된다.

1. High Pressure Supply Pump ; 고압 발생, 송출
2. Common Rail 및 Pressure Control Valve (PCV); Accumulating & Pressure Regulating
3. Injector ; Injection Quantity and Timing
4. Electronic Control Unit (ECU)
5. Pressure Sensor 외 각종 Engine Control Sensor



| 항목                              | 사양                    |
|---------------------------------|-----------------------|
| 압력 발생부                          | Radial 3 Plunger Pump |
| Pump 토출량 (mm <sup>3</sup> /rev) | 600                   |
| 분사량 (mm <sup>3</sup> /st)       | 1 ~ 80                |
| 분사압력 (bar)                      | 최대 1600               |
| Solenoid Valve                  | 2-Way Valve           |

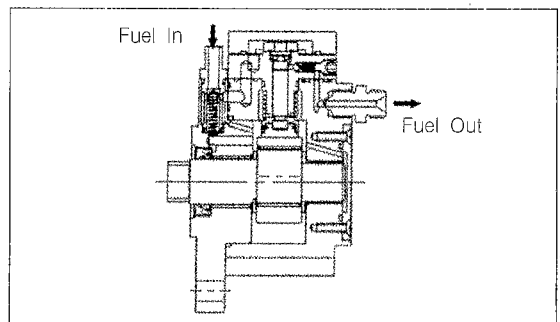
〈Fig. 1〉 Common Rail Injection System 의 개략도와 주요 사양

〈Fig. 1〉은 Common Rail Injection System 의 개략도와 주요 사양을 나타낸 것이다. High Pressure Supply Pump는 연료 Tank로부터 공급된 연료를 압축하여 고압의 연료를 생성하고 Common Rail로 압송하게 된다. Common Rail의 Pressure Control Valve(PCV)는 Duty비로 제어되며 Rail내의 압력을 제어하는 역할을 한다.

또한 Common Rail에 장착된 압력 Sensor는 Common Rail내의 압력을 측정하여 ECU에 전달하게 된다. PCV 및 압력 Sensor와 ECU는 Closed Loop를 형성하여 Common Rail의 압력을 제어한다. ECU는 엔진 속도와 분사량에 따른 목표 압력과 Common Rail의 실제 압력을 비교하여, Common Rail 압력 변화를 최소화하기 위해 PCV의 스프링력을 제어한다. Injector는 고압 Pipe에 의해 Common Rail로부터 고압의 연료를 공급받는다. 분사는 Injector내의 Solenoid에 의해 제어되는 2-Way Solenoid Valve에 의해 이루어진다. ECU에 의해 발생하는 Pulse에 의해 분사과정이 수행되며 분사시작과 분사종료가 제어된다. 분사량은 Common Rail 압력, Nozzle의 유압유량과 ECU의 Pulse 폭에 의해 결정된다.

### 3.2 High Pressure Supply Pump

〈Fig. 2〉는 High Pressure Supply Pump의



| 항목                 | 사양            |
|--------------------|---------------|
| Cam Type           | Eccentric Cam |
| Cam Lift (mm)      | 5.13          |
| Camshaft Dia.(mm)  | ∅20           |
| Plunger Dia.(mm)   | ∅7            |
| Plunger 배열 및 개수    | 120° × 3      |
| 운행 방식              | Fuel          |
| Inlet Safety Valve | Piston Type   |
| Inlet Valve        | Plate Type    |
| Outlet Valve       | Ball Type     |

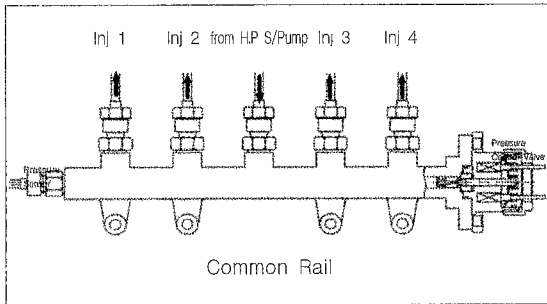
〈Fig. 2〉 High Pressure Supply Pump의 구조와 주요 사양

## 특집 디젤엔진

구조 및 주요사양을 나타내었다. High Pressure Supply Pump의 성능은 고압 토출 능력과 낮은 구동토크, Common rail의 낮은 압력맥동, PCV의 제어성, 내구성에 달려있다. 이러한 성능을 고려하여 구동토크가 낮고 압력맥동이 낮은 Eccentric Cam과 120°로 배열된 Radial 3 Plunger를 적용한 High Pressure Supply Pump를 설계하였다.

### 2.2 Common Rail 및 Pressure Control Valve (PCV)

High Pressure Supply Pump에서 고압의 연료를 공급받아 Pressure Control Valve(PCV)의 Duty비 (Voltage on-off Ratio) 제어에 의해 고압을 제어하며 Injector로의 연료공급을 수행하는 역할의 Common Rail과 PCV의 장착 모습을 <Fig. 3>에 나타내었다.

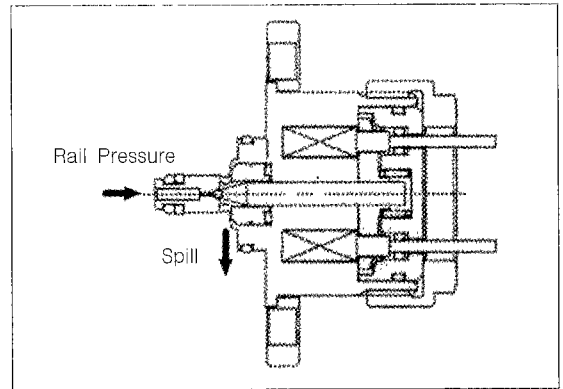


<Fig. 3> Common Rail 및 Pressure Control Valve

PCV는 Common Rail에 장착되어 Common Rail내의 압력을 제어하는 것으로 <Fig. 4> 및 <Fig. 5>는 PCV의 구조와 힘의 평형 관계를 나타낸 것이다.

PCV 입구측에 고압이 존재하여 솔레노이드를 단전(Off)시키면 ( $F_{Magnet}=0$ )  $F_{High Pressure} > F_{Spring}$ 로 되어 PCV가 열리게 되어 연료탱크로 리턴된다. 압력을 증가시키기 위하여 솔레노이드를 통전(On)시키면 힘평형  $F_{Magnet} + F_{Spring} = F_{High Pressure}$ 로 될 때까지 PCV가 닫혀있다.

솔레노이드의 자기힘  $F_{Magnet}$ 은 전류에 비례하는

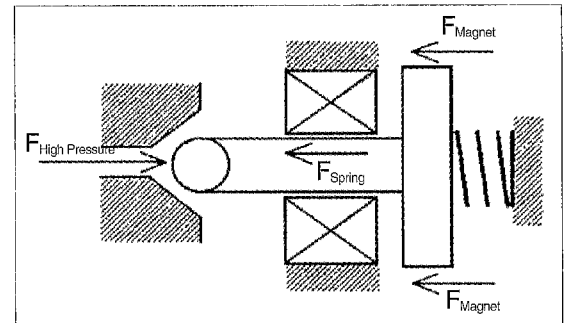


| Type               | Ball           |
|--------------------|----------------|
| Spring 상수 (kgf/mm) | 1              |
| Coil dia. (mm)     | $\phi 0.35$    |
| 저항 ( $\Omega$ )    | 2.34           |
| 인덕턴스 (mH)          | 3.26 (at 1kHz) |
| 전류 사용 범위 (A)       | 0 ~ 2.5        |

<Fig. 4> PCV의 구조와 주요사양

데, 제어기간내에서 펄스폭을 제어하여 전류크기를 변화시킴으로써 압력을 제어한다.

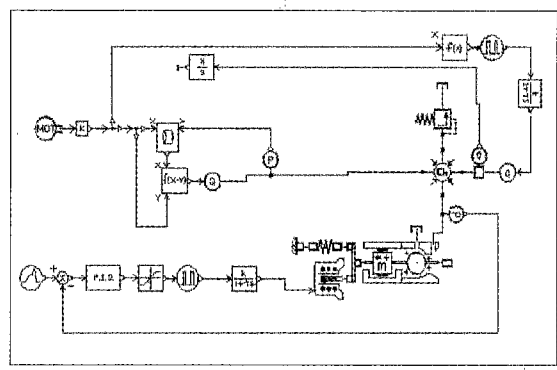
제어주파수는 Armature 흔들림 또는 Rail내의 Fluctuation을 방지하도록 1kHz 정도로 충분히 커야 한다.



<Fig. 5> Force Balance at Pressure Control

<Fig. 6>은 PCV 작동에 대한 Simulation을 하기 위해 AMESim Software를 사용하여 Modeling 한 것이다. Duty비 제어에 의한 압력

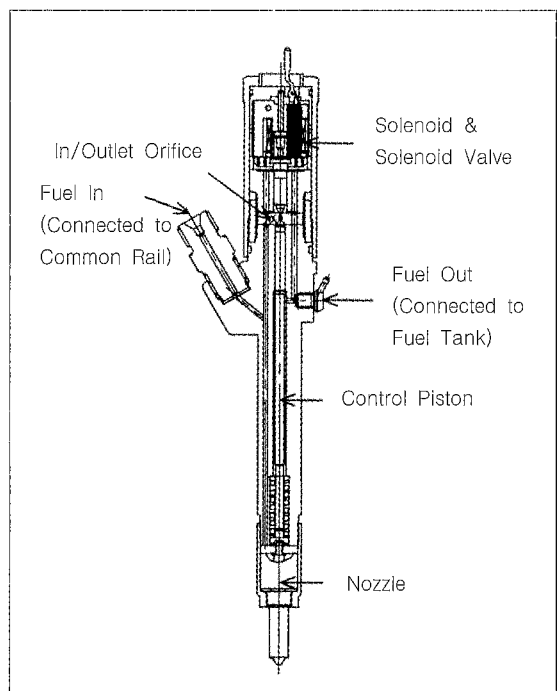
제어 거동을 예측하기 위한 것으로 현재 PCV 실험결과를 토대로 Tuning중에 있다



<Fig. 6> AMESim Modeling Diagram

### 2.6 Injector

Injector는 2-Way Solenoid Valve 제어에 의해 원하는 분사량을 엔진 실린더 내로 분사한다. <Fig. 7>은 Injector의 구조를 나타낸 것이다.



<Fig. 7> Injector의 구조와 주요사양

- Injector는 다음과 같은 요소로 구성된다.
- 일반 Nozzle Holder와 유사한 Injector Body
  - Multi-Hole Nozzle
  - Control Chamber의 압력을 제어하는 In/Out Orifice와 Control Piston
  - Outlet Orifice 개폐를 수행하는 Solenoid Valve와 Solenoid

#### ○ Solenoid Valve 비작동시

Solenoid Valve의 비작동시 Solenoid Valve Spring에 의해 Outlet Orifice를 폐쇄한다. 따라서 Control Chamber내의 압력은 Common Rail의 압력과 같은 수준으로 유지되며, 이 압력은 Control Piston의 상단과 Nozzle의 Seat부에 균일하게 작용하며 이 두면의 면적차 ( $A_{cp} > A_n$ )에 의해 분사는 수행되지 않는다.

#### ○ Solenoid Valve 작동시

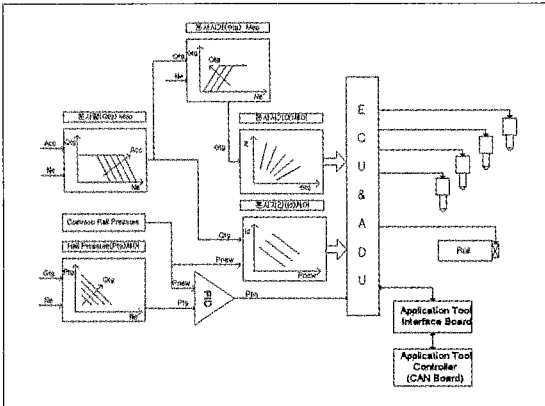
ECU에 의해 Solenoid Valve가 작동하면 분사 과정이 시작된다. Solenoid Valve의 작동으로 Outlet Orifice는 개방되고 Control Chamber의 압력은 In/Outlet Orifice 비율에 따라 특정 압력까지 강해진다. 따라서 Common Rail의 고압의 압력은 지속적으로 Nozzle의 Needle Valve 하단에 작용하며 Control Piston은 상대적으로 저하된 압력이 작용하여 분사가 시작된다. 분사되는 연료량은 Nozzle의 개폐 기간, Nozzle의 유압유량과 분사압력에 따라 결정된다.

### 2.6 ECU

<Fig. 8>은 ECU의 Block Diagram으로 Software와 Hardware의 개발내용을 나타낸 것이다.

#### 2.6.1 ECU SW개발

Common Rail용 전자제어 장치는 엔진 및 차량의 각종 센서의 정보를 검출하여 최적의 분사기간



- Software**
1. Map에 의한 분사량 제어
  2. Map에 의한 분사시기 제어
  3. Rail압 PID제어
  4. CAN 통신을 이용한 Application Tool 개발
- Hardware**
1. 12V용 Injector용 ADU개발 (6V -18V)
  2. Duty제어 방식의 PCV용 ADU개발

〈Fig. 8〉 ECU Block Diagram

과 분사시기 및 레일의 압력을 제어하기 위한 제어 프로그램을 C언어로 작성하였다.

본 장치의 소프트웨어 Flowchart를 〈Fig. 9〉에 나타내었고 전원이 공급되면 변수 및 SFR(Special Function Register)을 초기화하고 일정한 주기로 센서값을 검출한 후 노이즈를 제거하기 위해 Filtering 프로그램을 수행한다. 엔진의 회전수 및 회전각을 5도마다 측정하여 계산하도록 되어 있으며 압력제어와 분사시기 및 분사시간은 Mode판단에 따라 3차원 Map Data을 연산하거나 Map Data의 각도를 시간으로 환산하여 Reference 센서와 회전수 센서의 인터럽트 Routine에서 사용하여 제어하였다.

연료 분사량을 제어하기 위해 크게 3가지 모드로 구분하여 제어가 수행된다. 첫째, Start 모드로서 원활한 엔진 시동을 위해 연료량 및 분사시기를 제어함으로써 시동성을 향상시킬 수 있도록 하였

다. 둘째, Idle 모드는 PID제어를 통해서 목표 회전수로 제어할 수 있도록 하였으며 셋째, Drive 모드는 연비, 동력성능, 배기가스 규제에 만족하는 Drive Q Map을 기본으로 각종 보정 Map을 통하여 보정함으로써 최적의 분사량 및 분사시기를 제어할 수 있게 하였다. 그 외 Rail의 압력은 분사량과 압력에 따른 Map제어와 PID제어를 통해 PCV의 Duty비를 변화시킴으로써 제어하였고 CAN통신을 이용하여 DDU(Data Display Unit)에 각종 Data을 표시하였다.

### 2.5.2 ECU I/W 개발

#### 1) PCV용 ADU 개발

Rail의 압력을 제어하는 PCV의 제어는 Duty제어 방식에 의해 제어된다. Valve의 솔레노이드에 일정한 주파수로 Duty를 변화시키면서 스위칭하게 되고 이때 밸브에 흐르는 전류값의 평균값에 의해 Rail의 압력을 조절할 수 있다. 〈Fig. 10〉에 PCV의 구동회로 및 구동 방식에 대해 간략하게 나타내었다.

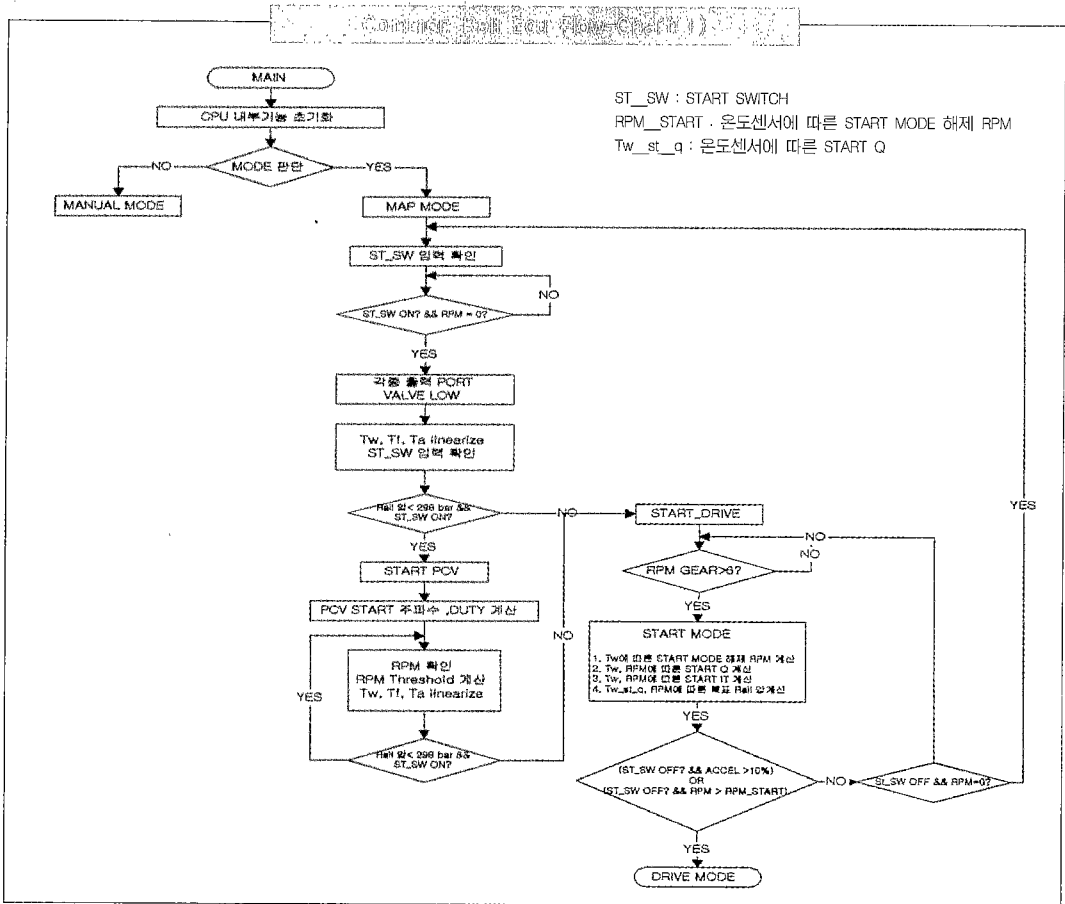
〈Fig. 10〉우측의 PWM신호가 좌측 회로의 TR1에 인가 되면 이 신호에 따라 솔레노이드 밸브에는 우측 상단과 같은 구동전류가 흐르게 된다. PWM파의 Duty비가 커질수록 평균 전류값은 커지고 Rail의 압력도 높아지게 된다.

## 3. 실험 결과

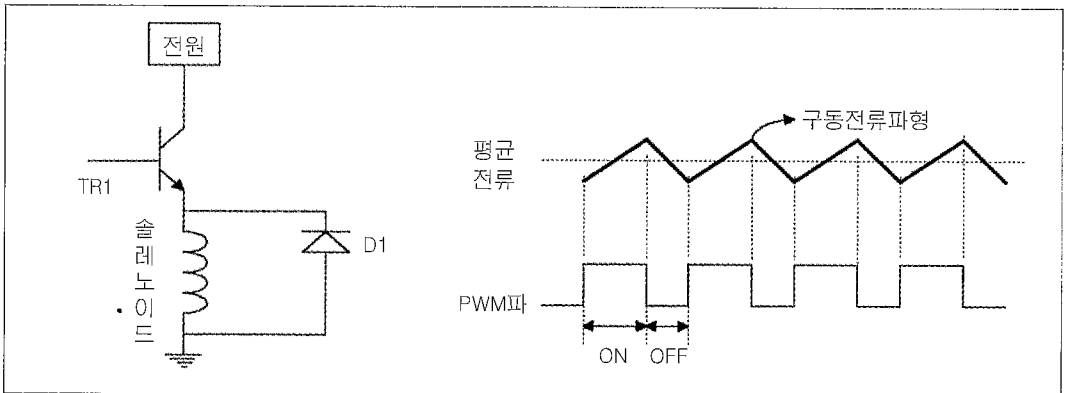
### 3.1 High Pressure Supply Pump 성능 실험

〈Fig. 11〉은 Common Rail내의 압력을 일정하게 유지한 상태에서 전 Pump 회전수에 대하여 High Pressure Supply Pump의 용적효율( $\eta_v$ )을 시험 평가한 결과이다. Rail압력이 1,200bar 일 때 500rpm에서 용적효율이 80%이상 되는 것을 알 수 있다.

### 3.2 Injector 성능실험



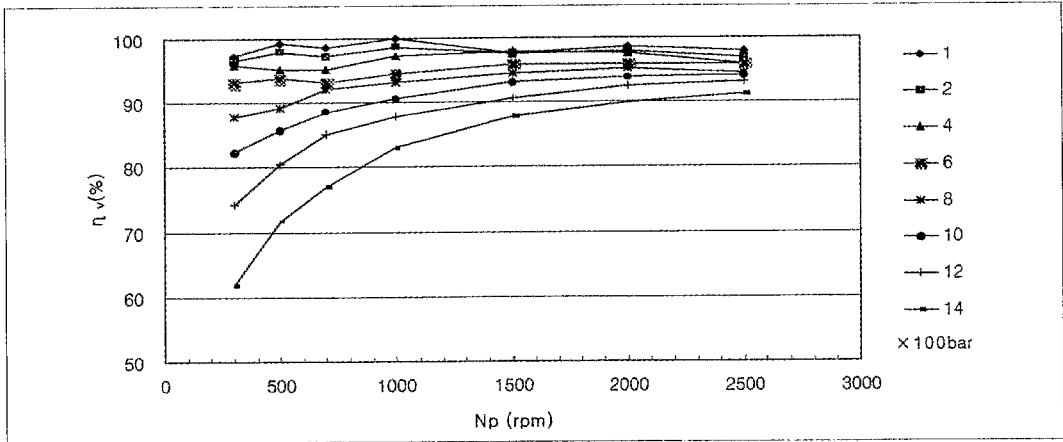
<Fig. 9> ECU Main Flowchart



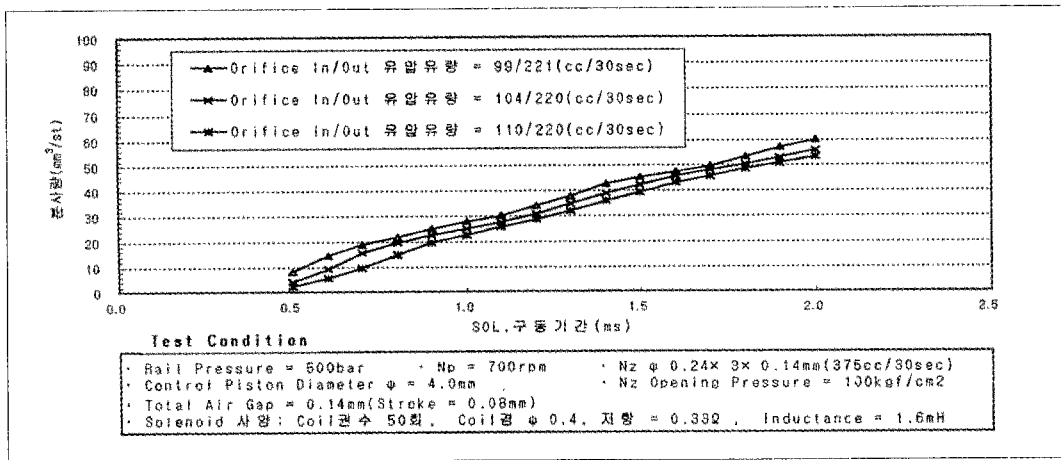
<Fig. 10> PCV Duty제어 구동회로 및 구동방식

<Fig. 12>은 Injector의 Orifice를 변경하여 Solenoid의 구동기간에 대한 분사량을 측정하는 것

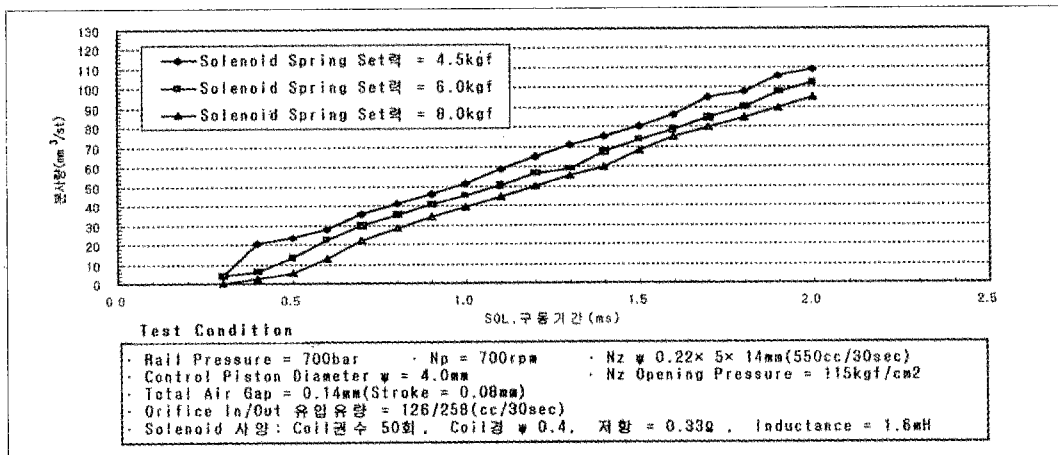
이다. Outlet부의 유압유량이 일정할 때 Inlet부의 유압유량을 증가시키면 Control Chamber내



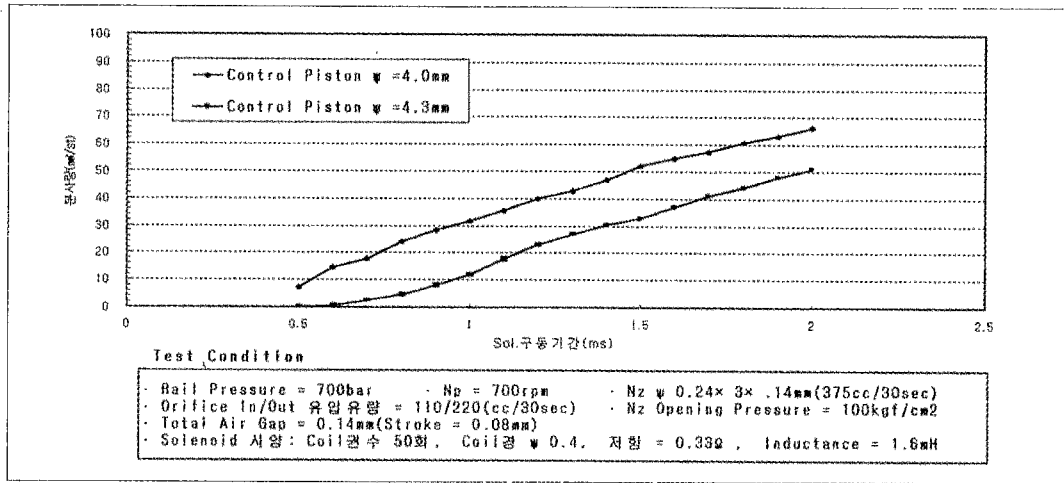
<Fig. 11> High Pressure Supply Pump의 용적효율 평가실험



<Fig. 12> Injector Orifice 변경실험



<Fig. 13> Injector Solenoid Set력 변경실험



〈Fig. 14〉 Injector Control Piston 변경실험

의 압력변화가 둔감해져 분사율 상승기울기는 미비하게 감소하고 하강기울기는 동일하며 분사기간이 짧아져 분사량은 감소하고 최소 안정분사압은 증가한다.

〈Fig. 13〉는 Injector의 Solenoid Spring Set력을 변경하여 Solenoid의 구동시간에 대한 분사량을 측정한 것이다. Solenoid Spring Set력이 증가할수록 분사기간이 줄어들면서 분사량이 감소하고 분사율 하강 기울기는 동일하게 나타난다. Spring Set은 흡인력과 상관관계가 있으므로 충분한 흡인력을 확보하는 Set력을 선정해야 한다. 충분한 흡인력을 확보한 상태라면 Spring Set이 클수록 Falling Time이 단축되는 효과를 나타낼 수 있다.

〈Fig. 14〉은 Injector의 Control Piston을 변경하여 solenoid의 구동시간에 대한 분사량을 측정한 것이다. 동일한 Orifice에 Control Piston 직경이 증가할수록 Control Chamber내의 Control Piston의 수압면적이 증가하게 되어 분사종료점 및 분사율 상승기울기가 동일하고 분사기간이 짧아져 분사량은 감소하고 최소 안정분사압은 증가한다.

#### 4. 결론

- 1) Eccentric cam과 Radial 3Plunger를 적용한 고압 Supply Pump는 압력맥동 저감, 구동토크 저감, 소음 저감 등의 장점이 있다.
- 2) PCV는 다른 압력제어방법보다 구조가 간단한 반면, 불필요한 스피어량은 구동토크를 소비시키고 스피어 발열되는 단점이 있다.
- 3) High Pressure Supply Pump의 용적효율( $\eta_v$ )을 시험 평가한 결과, Rail압력이 1200bar일 때 500rpm에서 용적효율이 80%이상 이 된다.
- 4) Injector의 Control Piston 직경이 증가할수록, 그리고 Inlet부의 유압유량이 증가할수록 분사량은 감소하고 최소 안정분사압은 증가한다. 또한 Solenoid Spring Set력이 증가할수록 분사량은 감소한다.
- 5) 향후 계속해서 추진되어야 할 사항은 압력제어방법 즉, Inlet Metering 방법과 PCV의 Duty제어 방식에 관한 연구와 계산과정을 통해 얻어진 결과를 지속적으로 검토한 후 System의 내구 및 신뢰성을 더욱 높이도록



할 것이다.

- 6) 또한, 성능 향상을 위한 지속적인 연구개발을 통하여 다양한 제어 방식의 Common Rail Injection System을 만들고 있다.

### 〈참 고 문 헌〉

1. Magin Lapuerta, Octavio Armas, Juan Jose Hernandez, "Effect of Injection Parameters of a Common Rail Injection System on Diesel Combustion through Thermodynamic Diagnosis", SAE paper 1999-01-0194
2. Wolfgang Boehner and Karsten Hummel, "Common Rail Injection System for Commercial Diesel Vehicles", SAE paper 970345
3. Tetsuro Kato, Takeshi Koyama, Kenji Sasaki, Koji Mori and Kazutoshi Mori, "Common Rail Fuel Injection System for Improvement of Engine Performance on Heavy Duty Diesel Engine", SAE paper 980806
4. 이재기, 나형규, 안성일, "Common Rail용 Injector 성능에 영향을 주는 Parameter와 설계 변경에 따른 분사 특성 파악" 한국자동차공학회 추계 학술논문집, 1999
5. 이재기, 나형규, 김명곤, "Common Rail용 Injector 성능에 영향을 주는 Parameter와 설계 변경에 따른 분사 특성 파악-II" 한국자동차공학회 추계 학술논문집, 2000

〈이재기 수석연구원 : nobody@mail2.shinbico.com〉