

# 고압 분사용 Piezo 인젝터의 Pilot 분무특성

배장웅<sup>†</sup>·김하늘<sup>\*</sup>·이진욱<sup>\*\*</sup>·강건용<sup>\*\*</sup>·류정인<sup>\*\*\*</sup>

## Pilot Spray Characteristics of Piezo type Injectors for High Pressure Injection

J.W.Bae, H.N.Kim, J.W.Lee, K.Y.Kang and J.I.Ryu

**Key Words:** Common-rail System(커먼레일 시스템), Pilot Injection(사전 분사), Inverse Piezoelectric Effect(역압전 효과), Piezo type Injector(피에조 방식 인젝터)

### Abstract

Future exhaust gas limits for diesel-driven passenger cars will force the automotive industry to significantly improve the performance of engine. Since modern common-rail injection systems deliver more degrees of freedom referring to the injection process, again the optimization of the injection process could offer a possibility to meet the exhaust gas limits.

This study describes the characteristic the pilot spray structure of piezo-driven injector for a passenger car common-rail system to be applicable multiple injection caused by fast response rather than solenoid-driven injector. The piezo-driven injector is prototype injector with same needle chamber of solenoid injector and the solenoid-driven one is commercial injector. The pilot spray characteristic such as spray tip penetration, spray speed, spray angle were obtained by spray images, which is measured by the Mie scattering method with optical system for high-speed temporal photography. It was found that piezo-driven injector effected electric change as important factor and showed faster response than solenoid-driven injector.

### 1. 서 론

최근 높은 연료경제성과 CO<sub>2</sub>의 저감 규제에 의하여 직접분사식 디젤엔진이 주목을 받고 있으며, 이러한 엔진의 성능 향상을 위하여 엔진내의 유동장과 분사계를 최적화하는 노력이 진행되고 있다. 커먼레일(common-rail)을 적용한 초고압 직분식(direct injection) 디젤엔진은 이와 같은 환경

규제에 대응하기 위한 대안으로 여겨지고 있는 첨단 디젤엔진이며, 가솔린엔진에 비해 연료절감 및 CO<sub>2</sub> 배출감소 효과가 큰 것으로 알려져, 이에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.[1, 2]

이러한 디젤 엔진에 적용되는 커먼레일 시스템의 특징인 Pilot 분사는 연소 압력의 증가, 주분사 착화지연의 감소 효과 있어, 소음저감, 연료소비율, 배기 가스 저감의 효과적인 방법으로 적용되어 왔으나, 앞으로 Multiple 분사인, 다중분사로 세분화함으로써 Trade-off 관계의 이러한 요소들에 대하여 양호한 균형점을 찾으려 하고 있다. 이러한 고압분사와 다중분사는 현재의 솔레노이드(solenoid) 방식 인젝터에서 보다 전류 응답 시간이 짧은 피에조(piezo) 방식 인젝터로의 개발에 관건이 되어가고 있다.

따라서 본 연구에서는 짧은 시간 내 소량의 연료를 분사하여 사전분무를 가지는 커먼레일 시스

† 충남대학교 대학원

E-mail : iwoonge@hotmail.com

TEL : (042)868-7665

\* 명지대학교 대학원

\*\* 한국기계연구원

\*\*\* 충남대학교 기계공학과

템에서, 피에조 방식 인젝터의 분무 특성을 알아보고, 현재의 솔레노이드 방식 인젝터와 비교하고자 하였다.

## 2. 피에조 인젝터의 특징

### 2.1 역 압전 효과

피에조 스택(piezo stack)에 물리적 힘을 가하면 그 가해진 힘의 방향과 크기에 따라 전압이 발생하며 이것을 압전 효과(piezoelectric effect)라 하고, 반대로 전압을 가하면 극과 크기에 따라 스택의 길이가 변하는 데 이를 역 압전효과(inverse piezoelectric effect)라 한다. Fig. 1은 가해지는 전압의 극에 따라 스택의 변화가 발생함을 나타낸 것이다. 피에조 스택의 변위는 인장계수, 스택의 층수, 작동 전압에 따라 결정되기 때문에 식(1)으로 계산되어질 수 있다.[3]

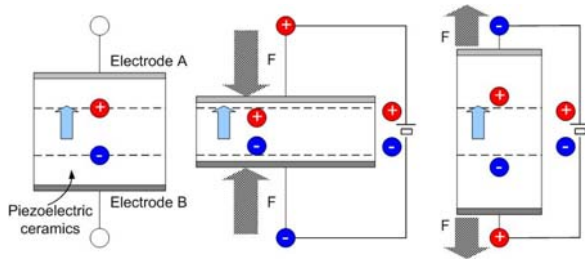


Fig. 1 Inverse piezoelectric theory

$$Pd = C_n \cdot N \cdot V$$

$$\begin{aligned}
 Pd &= \text{스택변위} \\
 C_n &= \text{인장계수}(m/V) \\
 N &= \text{스택의 적층수} \\
 V &= \text{전압}(V)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

### 2.2 피에조 인젝터

현재의 피에조 방식 인젝터는 이러한 역압전 효과를 응용한 것으로 가해지는 전류가 인젝터의 특성을 좌우한다. Fig. 2는 기존의 솔레노이드 방식 인젝터의 니들부를 공유하는 Prototype 피에조 방식 인젝터(DPICO)의 내부를 나타낸 것이다. 동일 극의 전류가 흐르면 피에조 스택은 그 전류를 저장하여 수축되며 니들이 올라가도록 이루어져 있으며, 저장된 전류를 방전시키면 원래의 길이로 되돌아간다. Fig. 3은 이러한 피에조 인젝터의 전류 파형을 나타낸 것이다.[4]

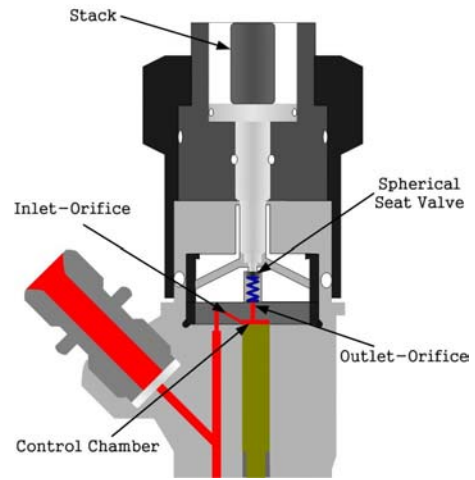


Fig. 2 Flow structure of piezo control chamber

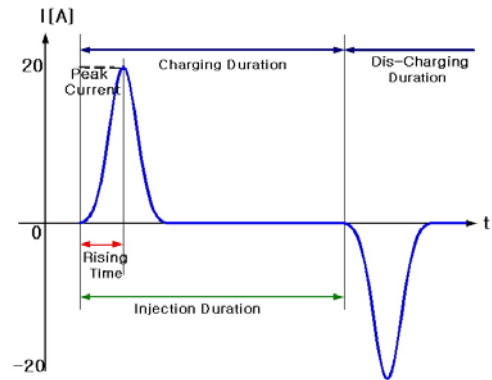


Fig. 3 Current wave of piezo injector

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치 구성

커먼레일 시스템에서의 구동방식에 따른 인젝터의 특성 실험을 위하여 고압연료 시스템, 분무가시화 시스템으로 Fig. 4와 같이 구성하였다.

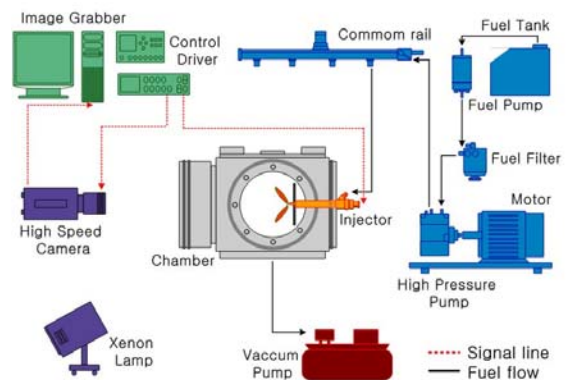


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

### 3.1.1 고압 연료 시스템

커먼레일내 고압연료를 저장하기 위해서 실제 자동차용 엔진에 적용되는 고압펌프를 이용하여 200MPa까지 가압할 수 있었으며, 본 실험에서는 최대 3.7kW (60hz, 2000rpm)출력을 발생시키는 DC 모터에 의해 구동되게끔 직렬로 장착하였다. 커먼레일은 Fig. 5와 같은 배기량 2.0ℓ 급 디젤엔진에 적용되는 시스템을 적용하였다.

이러한 고압연료는 인젝터를 통해 분사되는데, 분사시간 및 분사압력은 별도의 인젝터 드라이버 (TDA-3200H)를 사용하여 제어되도록 하였다. 이후, 분무실내 분사된 연료는 배기펌프(680mmHg)를 통해 순간적으로 분무실을 빠져 나가도록 구성하였다.

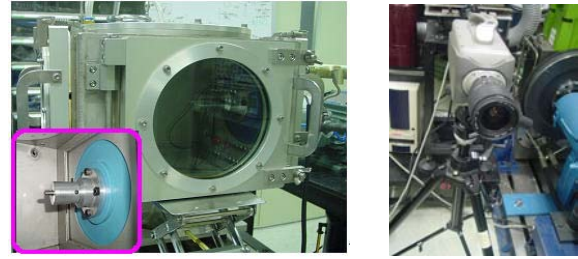


Fig. 5 High pressure common-rail system for injection

### 3.1.2 분무 가시화 시스템

분무 가시화를 위해 Fig. 6(a)과 같은 분무실 챔버의 전체 크기는 350(L) × 320(B) × 250(H)mm이며, 챔버의 수직면에 인젝터 어댑터를 설치하였다. 분무현상을 관측하기 위해 설치한 창(window)은 직경 200mm, 두께 20mm의 석영(quartz)으로 제작하였다.

이미지 획득을 위해 Fig. 6(b)과 같은 50,000fr/s 인 High Speed Camera(Phantom v7.0)를 사용하였으며, 광원으로는 제논램프(최대출력 2kw)를 이용하였다. Pilot 분사와 카메라 촬영의 동기화를 위해 Pulse generator(DG 535)를 이용하여 고속의 이미지를 획득하였다.



(a) Spray chamber

(b) H. S. Camera

Fig. 6 Equipment for spray visualization

### 3.1.3 가속도(accelerator) 센서

피에조 인젝터의 니들의 거동을 확인하기 위하여 압전소자를 가진 가속도센서를 니들 중심축의 방향의 인젝터 외부에 설치 후 오실로스코프를 통하여 간접적으로 니들의 거동을 측정하도록 하였다.

## 3.2 실험 방법

고압 디젤 엔진용 인젝터들에 대한 pilot 분무 특성을 해석하고자, 실제 2.0ℓ 급 직분식 디젤엔진의 분사맵(injection map)을 기준으로 하여 실험 조건을 설정한 후, 각 인젝터별로 실제 연소실내 벽면과의 충돌을 배제한 자유분무에 대해 고속 분무 이미지 획득을 통한 실험적 해석을 하였다.

본 실험시 분사조건은 40MPa, 70MPa, 100MPa, 130MPa의 4가지 분사압력에 대하여, 주위 유동이 정지한 상태의 상온, 상압하에서 수행하였다. 고압 연료분사 기간은 실제 엔진의 사전분사 기간인 200 $\mu$ s, 250 $\mu$ s으로 하였다.

실험에 적용한 커먼레일용 인젝터로는 솔레노이드 인젝터는 상용화 인젝터이고, 피에조 인젝터는 상용 솔레노이드 인젝터와 니들부를 공유하며, 7A의 전기적 용량을 가진 Prototype이다. Table. 1은 실험에 적용한 인젝터의 제원을 나타낸 것이다.

Table. 1 Specification for injectors

Driven Type	Peak Current (A)	Hold Current (A)	Rising Time ( $\mu$ s)	Number of Holes	HFR (cc/30s)
Solenoid	22	12	160	5	400
Piezo	7	-	40~60	5	400

### 4. 실험결과

#### 4.1 피에조 인젝터의 니들 거동

솔레노이드와 피에조 인젝터에 가속도센서를 이용하여 니들의 거동에 대해 예측하였다. Fig. 7은 피에조 인젝터에 가속도 센서를 이용하여 진동을 측정된 결과를 나타낸 것으로, 니들의 거동을 측정된 결과, 니들이 정상적으로 개폐하여 분사가 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 전류 파형을 비교함으로써 솔레노이드 인젝터에 비해 피에조 인젝터에서 빠른 상승 시간(rising time)을 나타내었다.[5, 6]

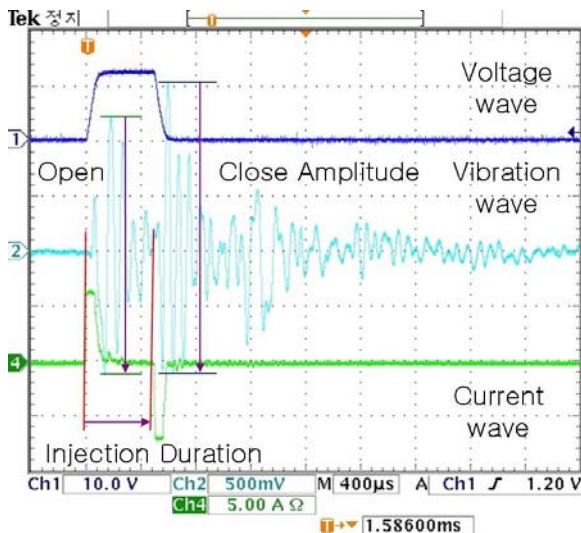


Fig. 7 Fuel flow vibration inside piezo injection using accelerator

#### 4.2 분무의 발달 및 발달과정

솔레노이드와 피에조로 구동되는 인젝터로부터 분사되는 고압연료의 분무에 대한 특성을 해석하

기 위하여, 동일한 조건하에서 3회 반복 측정하여 분무발달과정을 비교하여 분석하였다.

Fig. 8은 각각의 인젝터에 있어서 분사압력을 130MPa인 조건하에서 사전분사시간을 250 $\mu$ s로 설정하여 카메라 노출시간을 37 $\mu$ s로 촬영한 분무발달 과정이다. 피에조 인젝터에 있어서는 7A와 120V의 전기적 인가를 기본으로 하여 분무하였다.

고압 Pilot 분사가 진행되는 동안 두 인젝터 모두 거의 일정한 비례적인 분사길이와 분사각을 형성하며 발달하였다. 하지만, 인젝터에 따른 수치적인 차이가 나타남을 알 수 있는데, 이는 구동방식이 다름에 따른 영향으로 볼 수 있다.

#### 4.3 전기적 변화에 따른 피에조 인젝터 특성

Fig. 9는 Piezo 인젝터에서의 전기적 변화에 따른 분무도달거리, 분무선단 속도, 분무각을 나타낸 것이다.

Fig. 9(a)는 인가전압을 120V로 고정 시킨후 40MPa의 분사 압력하에서 200 $\mu$ s의 Pilot 분사하면서 피에조 스택에 3A ~ 7A의 전류 변화를 주었다. 전류값이 상승함에 따라 분무선단의 속도와 분무각은 각각 증가하였다. 하지만 분사압력이 고압으로 진행될수록 낮은 전류값에 대해서는 분사가 이루어지는 영역이 존재함을 확인하였다.

또한 Fig. 9(b)는 피에조 스택에 7A의 전류값을 고정한 후 40MPa의 분사압력하에서 200 $\mu$ s의 Pilot 분사하면서 인가전압을 80V ~ 120V로 변화시켰다. 인가전압값이 상승하면서 분무선단의 속도는 증가하였지만, 분무각은 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 전류값과 마찬가지로 전압값에서도 분사압력이 고압으로 진행될수록 낮은 영역에서는 분사가 이루어지지 않았다.

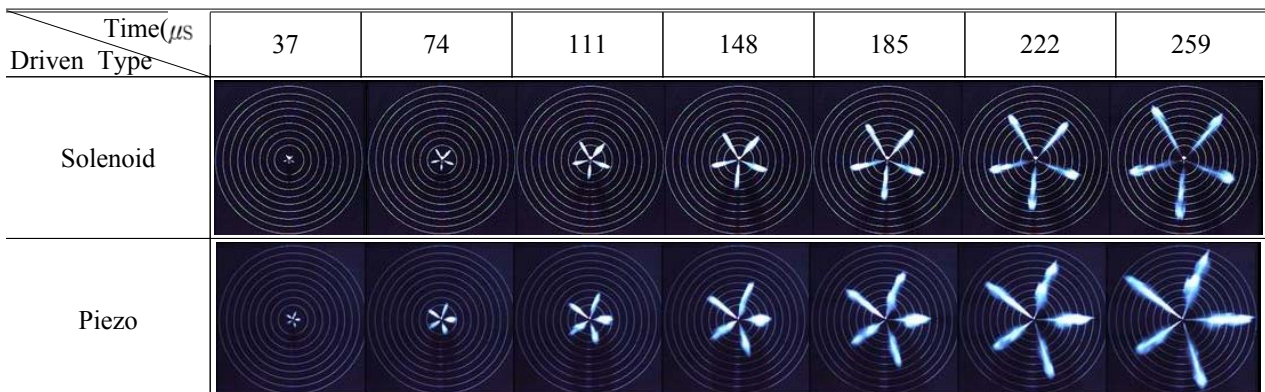
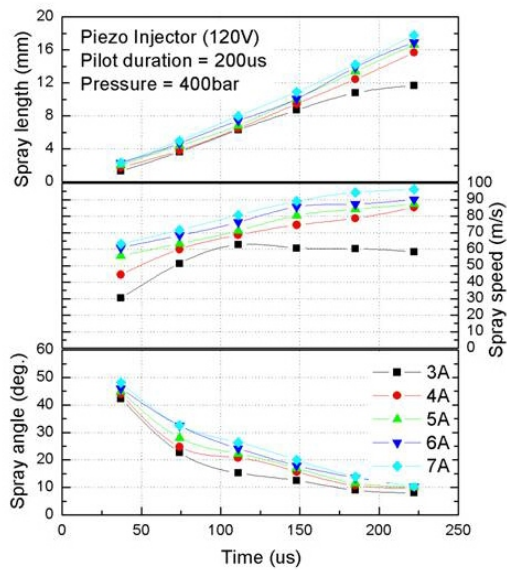
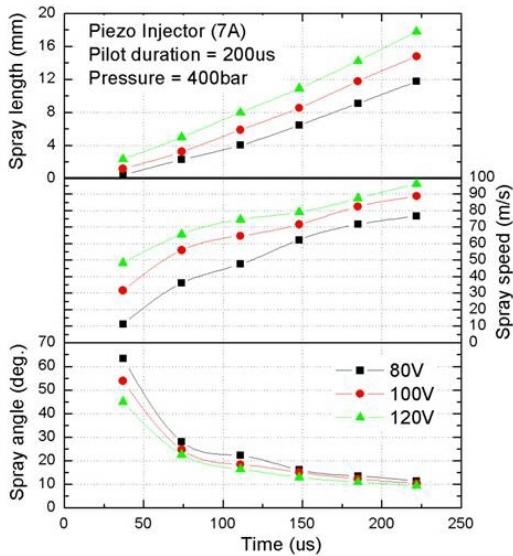


Fig. 8 Image of spray



(a) Voltage change output



(b) Current change output

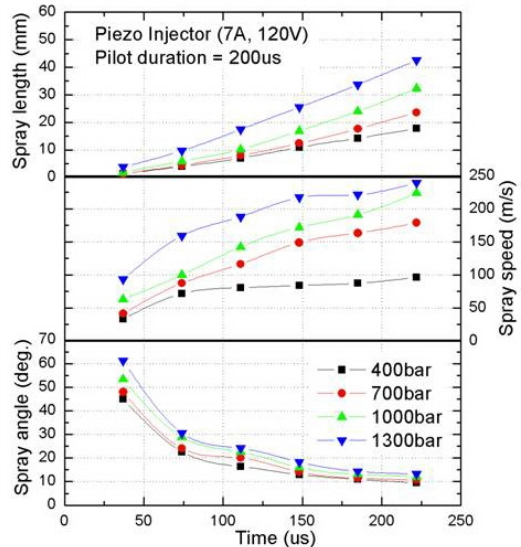
Fig. 9 Spray characteristic of piezo injector

4.4 압력에 따른 인젝터별 특성

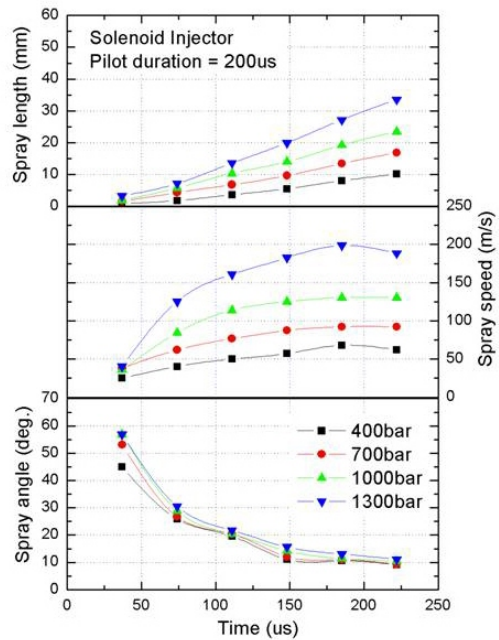
Fig. 10은 동일한 분사량을 기준으로 하여 솔레노이드와 피에조 인젝터에 대한 특성을 압력에 따른 분무도달거리, 분무선단 속도, 분무각을 나타낸 것이다.

두 인젝터 모두 압력이 증가함에 따라 분무선단의 속도와 분무각은 증가하였지만, 피에조 인젝터가 솔레노이드 인젝터에 비해 높은 초기 분무선단의 속도를 나타내고 있으며, 분무각에 있어서는 솔레노이드에 비해 넓게 형성하였다. 비

슷한 경향을 나타내었다. 이는 전류상승 시간이 빨라짐으로 이들의 움직임이 빠름을 알 수 있다.



(a) Piezo injector



(b) Solenoid injector

Fig. 10 Comparison of different driven injector

5. 결 론

고압 분사용 커먼레일 적용 인젝터의 구동방식에 따른 피에조와 솔레노이드 인젝터별로 사전분사(pilot injection)에 의한 분무 특성을 실험한 결

과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 가속도센서를 이용하여 피에조 인젝터의 니들 거동을 예측한 결과 정상적으로 작동하는 것을 확인할 수 있었다.

2) 피에조와 솔레노이드 인젝터의 사전분사내분무 발달 과정시, 구동 방식에 관계없이 거의 비례적인 분사길이와 분사각을 형성함을 알 수 있었다.

3) 피에조 인젝터 구동에 있어서, 전압과 전류에 의한 전기적 변화를 주었는데, 전압이 증가할수록 분무선단 속도와 분사각은 증가하였고, 전류가 증가할수록 분무선단의 속도는 증가하였지만 분사각은 감소하였다. 또한 각각 고압으로 분사가 진행됨에 따라 낮은 전기적 영역에서는 분사가 발생하지 않았는데, 이는 피에조 인젝터에 있어서 전기적 특성이 인젝터의 특성을 크게 좌우됨을 의미한다.

4) 동일한 분사량을 기준으로 사전분사에 대하여 실험한 결과, 두 인젝터 모두 압력이 증가할수록 분무선단의 속도와 분무각은 증가하였지만, 피에조 인젝터에서 보다 높은 초기 분무선단의 속도를 나타냈는데 이는 전류상승 시간에 따른 빠른 응답성의 결과임을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 국가지정연구실사업(NRL)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Jansons, M., Lin, S., Choi, D. S., Campbell, S. and Rhee, K. T., 1999, "Study of High-Pressure Injection DI Diesel Engine", SAE Paper 01-3494.
- (2) Kimura, S., Aoki, O., Ogawa, H., Muranaka, H. and Enomoto, Y., 1999, "New Combustion Concept for Ultra-Clean and High-Efficiency Small DI Diesel Engines", SAE Paper 01-3669.
- (3) Chun, D. P., Lim, J. S., Ahn, S. Y., Kim, H. S., Shin, S. J. and Yoo, W. J., 2003, "Piezo Injector Driving Circuit in Diesel Common-Rail

System", KSAE, pp. 391~396

- (4) Fetters, C. and Leipertz, A., 2001, "Potential of a Piezo-Driven Passenger Car Common-Rail System to Meet Future Emission Legislation-An Evaluation by Means of In-Cylinder Analysis of Injection and Combustion", SAE paper, 01-3499.
- (5) Sung, K. H., Park, S. B., Sunwoo, M. H. and Na, H. K., "A Study on the Model of and HSDI Common-Rail Injector and the Estimation of Needle Lift", KSAE, Vol. 10, No. 1, pp.59~66.
- (6) Ganser, M. A., 2000, "Common-Rail Injectors for 2000bar and Beyond", SAE paper, 01-0706.