

## 다른 구동방식을 갖는 고압 디젤 엔진용 인젝터의 Pilot 분무 특성 해석

배장웅<sup>\*</sup>, 김하늘<sup>\*\*</sup>, 이진욱<sup>\*\*\*</sup>, 강건용<sup>\*\*\*</sup>, 류정인<sup>\*\*\*\*</sup>

### Analysis of Pilot Spray Characteristics of Different Driven Injectors for High Pressure Diesel Engine

J.W.Bae<sup>\*</sup>, H.N.Kim<sup>\*\*</sup>, J.W.Lee<sup>\*\*\*</sup>, K.Y.Kang<sup>\*\*\*</sup>, J.I.Ryu<sup>\*\*\*\*</sup>

#### ABSTRACT

The capability of pilot injection with small fuel quantity at all engine operating conditions is one of the main feature of the common rail system. The purpose of the pilot injection is to lower the engine noise and to reduce the NOx emissions. This study describes the pilot spray structure characteristics of the common-rail diesel injectors, solenoid-driven and piezo-driven type, with different electric driving characteristics. So, three common-rail injectors with different electric current wave were used in this study. The pilot spray characteristics such as spray speed, spray tip penetration, and spray angle were obtained by spray images, which is measured by the back diffusion light illumination method with optical system for high-speed temporal photography. Also the CFD analysis was carried out for fuel behavior under high pressure in between needle and nozzle of solenoid-driven injector to know the condition of initial injection at experiment test. It was found that pilot injection of common-rail system was effected by rate of injection and temperature of injected fuel and electrical characteristic of the driven injector.

**Key Words** : Common-rail System(커먼레일 시스템), Pilot Injection(사전분사), Solenoid type Injector(솔레노이드 방식 인젝터), Piezo type Injector(피에조 방식 인젝터)

#### 1. 서 론

지구 온난화규제가 본격화되면서 자동차 산업은 기술과 정책에 대한 새로운 각도에서 재평가 필요성이 제기되고 있는 실정이다. 이러한 맥락의 일부로, 향후 발효될 자동차 CO<sub>2</sub> 규제에 대비하여 디젤엔진에 대한 사회적 인식의 전환과 첨단엔진 기술개발이 요구되고 있다. 커먼레일을 적용한 초고압 직분식(direct injection) 디젤엔진

은 이와 같은 환경규제에 대응하기 위하여 세계 주요 선진국 및 자동차회사에서 치열한 기술개발 경쟁을 벌이고 있는 첨단 디젤엔진이며, 가솔린 엔진에 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(common-rail) 시스템의 특징은 엔진회전수와 관계없이 인젝터의 연료공급압력을 제어하여 사전분사(pilot injection)를 통한 엔진소음 및 NOx 저감을 할 수 있다는 것이다. 또한 이후에 발생하는 연소장내에서 전개되는 주분사에 지대한 영향을 끼치게 된다. 즉, 연소실내 가연범위로 혼합된 연료-공기 혼합물의 점화지연기간이 짧아져 빠르게 연소가 일어나게 되며, 연료액적의 증발

\* 충남대학교 대학원

† iwoonge@hotmail.com

\*\* 명지대학교 대학원

\*\*\* 한국기계연구원

\*\*\*\* 충남대학교 기계공학과

시간도 짧아짐과 동시에 연소실내에서의 급격한 연소압의 증가를 방지할수 있다.[2]

본 연구에서는 짧은 시간 내 소량의 연료를 분사하여 사전분무를 가지는 커먼레일 시스템에서 고압 디젤 인젝터의 구동 방식에 따른 영향을 구하여, 연소장 형성 이전에 발생하는 사전분무의 특성을 해석하였다.

## 2. 인젝터 구동방식 분석

현재 상용화 되어 있는 커먼레일 적용 고압 인젝터는 솔레노이드(solenoid)와 피에조(piezo)에 의하여 니들 밸브(needle valve)를 개폐하는 방식이며, 일반 가솔린 인젝터와 달리 구동전류가 크다. Fig. 1은 커먼레일 적용 인젝터의 전류과형을 나타낸 것이다.

Fig. 1(a)는 솔레노이드 구동방식으로써 Peak and Hold 방식으로 전류를 제어하고 있으며, 전류 상승시간(rising time)과 하강시간(falling time)을 제어하여 인젝터의 응답성을 높이고 있다. Fig. 1(b)는 1(a)와 동일한 구동방식을 사용하나, 전류상승에 있어 차이를 보이고 있다. Fig. 1(c)는 피에조 구동방식으로써 Charging and Discharging 방식의 전류 구동을 하고 있으며, 초기 Peak 전류값에 도달한 후 피에조의 특성으로 니들을 유지하며, charging 기간동안에 분사가 이루어진다.[3, 4]

## 3. 연구방법

서로 다른 구동방식의 인젝터들에 대한 pilot 분무특성을 해석하고자, 실제 2.0ℓ 급 직분식 디젤 엔진의 분사맵(injection map)을 기준으로 하여 실험조건을 설정한 후, 각 인젝터별로 실제 연소실내 벽면과의 충돌을 배제한 자유분무에 대해 고속 분무 이미지 획득을 통한 실험적 해석방법과 이러한 분무현상을 발생시키기 직전의 노즐내부에서의 고압상태의 연료거동을 해석하는 수치해석 방법으로 크게 나누어 수행하였다.[5] 단,

수치해석에 있어 실험결과를 통한 일반적 특성의 인젝터를 선정하여 고압분사전, 노즐과 니들사이의 미소체적내 존재하는 고압 연료의 거동을 살펴보고자 하였다.

## 4. 실험적 해석

### 4.1 실험장치

커먼레일 시스템에서의 서로 다른 구동방식에 대한 인젝터의 특성 실험을 위하여 고압연료 시스템, 분무 가시화 시스템으로 다음 Fig. 2와 같이 구성하였다.

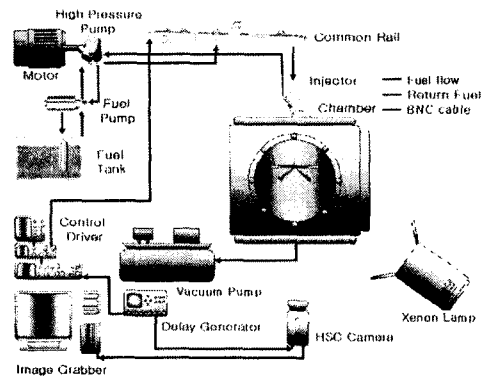
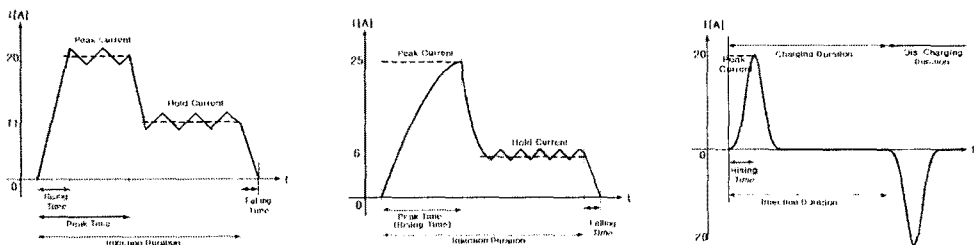


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

### 4.2.1 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. 3과 같은 배기량 2.0ℓ 급 디젤엔진에 적용되는 시스템을 적용하였다.

이러한 고압연료는 인젝터를 통해 분사되는데, 분사기간 및 분사압력은 별도의 인젝터 드라이버(TDA-3200H)를 사용하여 제어되도록 하였다.



(a) Solenoid-driven type(A) (b) Solenoid-driven type(B) (c) Piezo-driven type

Fig. 1 Current wave of common-rail injectors

이 후, 분무실내 분사된 연료는 배기펌프 (680mmHg)를 통해 순간적으로 분무실을 빠져 나가도록 구성하였다.

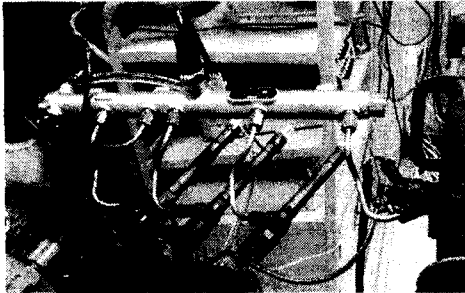
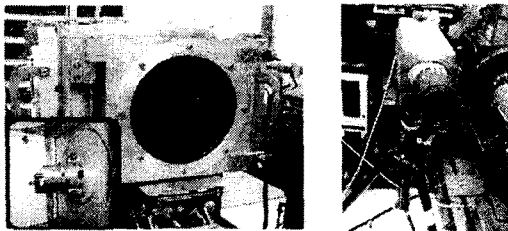


Fig. 3 High pressure common-rail system for injection

#### 4.2.2 분무 가시화 시스템

분무 가시화를 위해 Fig. 4(a)와 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. 4(b)와 같은 50,000fr/s인 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. 4 Equipment of spray visualization

#### 4.2 실험조건

본 실험시, 연료조건은 70MPa, 100MPa, 130MPa의 3가지 분사압력에 대하여, 주위 유동이 정지한 상태의 상온, 상압하에서 수행하였다. 고압 연료 분사시간은 실제 엔진의 사전분사 기간인 200 $\mu$ s, 250 $\mu$ s로 나누었다.

실험에 적용한 커먼레일용 인젝터로 솔레노이드 방식은 상용화 인젝터이고, 피에조 방식은 솔레노이드 A와 같은 니들부를 공유하며, 7A의 전

기적 용량을 가진 Prototype이다. Table. 1에 실험은 적용한 인젝터의 제원을 나타낸 것이다.

Table. 1 Specification for solenoid injectors

Driven Type	Peak Current(A)	Hold Current(A)	Rising Time( $\mu$ s)	Number of Holes	HFR	
Solenoid	A-1	22	12	160	5	400
	A-2	22	12	160	6	440
	B	25	6	260	6	440

피에조 인젝터는 solenoid A-1과 같은 분공수와 HFR 값을 갖는다.

#### 4.3 실험결과

##### 4.3.1 분무의 발달 및 발달과정

서로 다른 구동 방식의 인젝터로부터 분사되는 고압연료의 분무에 대한 특성을 해석하기 위하여, 동일한 조건하에서 2회 반복 측정하여 분무 발달과정을 비교하여 분석하였다. Fig. 5는 4개의 인젝터를 분사압력을 130MPa인 조건하에서 사전분사시간을 250 $\mu$ s로 설정하여 카메라 노출시간을 37 $\mu$ s로 촬영한 분무발달과정이다.

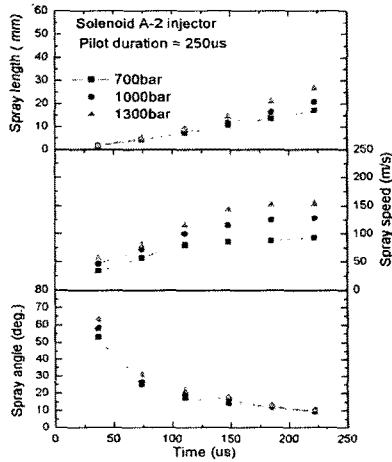
Type Time( $\mu$ s)	solenoid			piezo
	A-1	A-2	B	
37				
74	*		*	*
111	*	*	*	*
148	*	*	*	*
185	*	*	*	*
222	*	*	*	*
259	*	*	*	*

Fig. 5 Image of spray

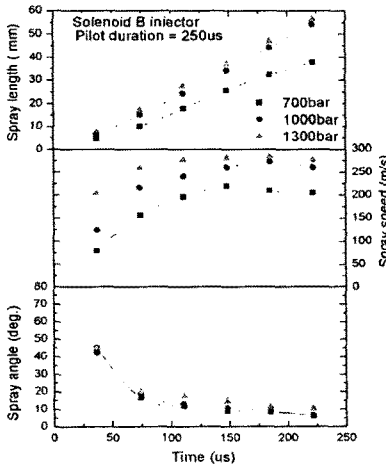
고압분사가 진행되는 동안 Solenoid A와 Piezo 방식에서는 일정한 거의 비례적인 분사길이와 분사각을 형성하며 발달하였지만 Solenoid B는 다소 비대칭적인(dis-symmetry) 분무 발달과정을 보였다. 또한 인젝터의 종류에 따라 수치적인 차이가 나타남을 알 수 있는데, 이는 인젝터의 구동방식에 따른 영향으로 볼 수 있다.

**4.3.2 압력에 따른 인젝터별 특성**

Fig. 6은 6개의 분공을 가진 솔레노이드 구동 방식중에 다른 구동 전류 과형을 가지는 인젝터인 Solenoid A-2와 solenoid B에 대한 도달거리 (spray tip penetration), 분무선단 속도(spray speed), 분무각(spray angle)을 나타낸 것이다.



(a) Solenoid A-2 Injector



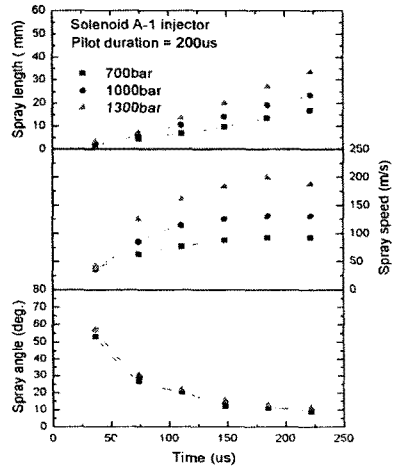
(b) Solenoid B Injector

Fig. 6 Comparison of spray characteristics different solenoid-driven injectors

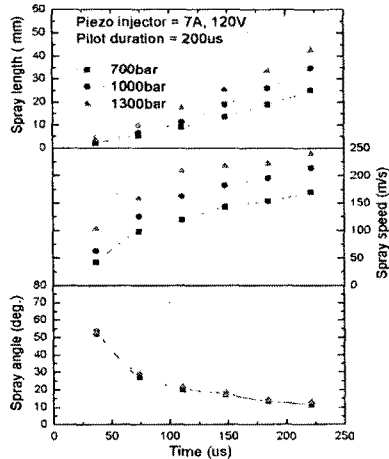
두 인젝터 모두 압력이 증가함에 따라 분무속도와 분무각은 비례적으로 증가함을 보였지만, 전류상승시간이 긴 solenoid B가 A-2보다 빠른 분무선단의 속도를 나타내고, 분무각은 작음을 알 수 있었다. 하지만 전류상승시간보다는 비대칭적인 분무발달과정의 영향으로 보인다.

Fig. 7은 5개의 분공을 가진 솔레노이드와 피에조 구동방식 인젝터인 Solenoid A-1과 피에조에 대한 도달거리, 분무선단의 속도, 분무각을 나타낸 것이다.

피에조 인젝터가 솔레노이드 인젝터에 비해 높은 분무선단의 속도를 나타내고 있으며, 분무각에 있어서는 비슷한 경향을 나타내었다. 전류상승시간의 짧아짐으로 이들의 움직임이 빠름을 알 수 있다.



(b) Solenoid A-1 Injector



(b) Piezo Injector

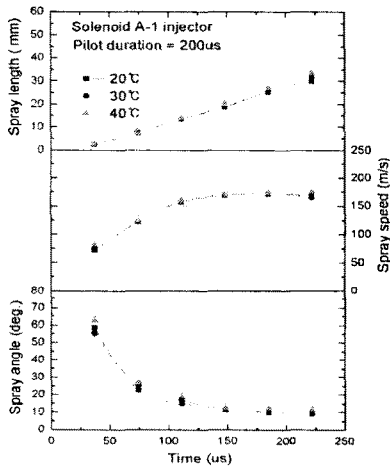
Fig. 7 Comparison of spray characteristics for solenoid and piezo injector

5. 수치 해석

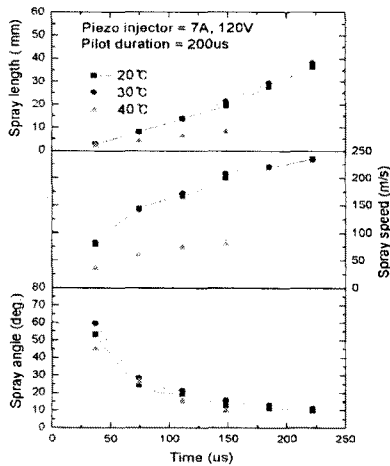
4.3.2 온도에 따른 인젝터별 특성

Fig. 8은 솔레노이드와 피에조 인젝터에 대하여 연료온도별로 도달거리, 분무선단의 속도, 분무각을 나타낸 것이다.

두 인젝터 모두 온도가 증가할수록 분무 선단의 속도는 비슷한 값을 나타냈으며, 분무각은 상대적으로 증가함을 알 수 있었다. 하지만 피에조에서 있어서 연료온도가 40℃에 이르자 분사가 잘 이루어지지 않았다. 피에조 인젝터 경우, 연료 온도의 한계구간이 존재함을 알 수 있었다.



(a) Solenoid A-1 Injector



(b) Piezo Injector

Fig. 8 Comparison of spray characteristics for fuel temperature

5.1 Mathematical Formulations

5.1.1 수치해석의 목적 및 이론

본 연구에서는 전산유체역학 코드인 Fluent를 이용하여 injector 내부 nozzle과 sac volume에서 형성되는 유동장과 압력장등을 통해 연료의 injector내에서의 3차원적인 연료거동을 고찰하고자한다. 본 해석에 적용된 method로는 내부 유동장을 계산하기 위하여 FVM을 바탕으로 SIMPLE-C 알고리즘으로 압력과 속도를 계산하는 FLUENT /UNS를 사용하였으며, 3차원 유동을 나타내기 위해 적용된 지배방정식은 다음과 같으며 난류모델로서는 RNG k-ε 난류모델을 사용하였다.

- (1) 연속방정식 :  $\partial/\partial x_i (u_i) = 0$
- (2) 운동량방정식 :  $\partial/\partial x_i (u_i u_j) = -\partial p/\partial x_i + \partial x_j [\mu_{eff} (\partial u_i/\partial x_j + \partial u_j/\partial x_i)]$
- (3) 난류에너지 방정식 :  $\partial/\partial x_i (\rho u_i k) = \partial/\partial x_i (\sigma_k \mu_{eff} \partial k/\partial x_i) + G_i \rho \epsilon$
- (4) 난류에너지 소산율 방정식 :  $\partial/\partial x_i (\rho u_i \epsilon) = \partial/\partial x_i (\sigma_\epsilon \mu_{eff} \partial \epsilon/\partial x_i) + C_1 \epsilon \epsilon/k G_i - C_2 \epsilon \rho \epsilon^2/k - R$
- (5) RNG k-ε 난류모델의 상수 :  $C_{\mu} = 0.09, \sigma_k = 1.4, \sigma_\epsilon = 1.3, C_{1\epsilon} = 1.4, C_{2\epsilon} = 1.8$   
(이 상수들은 경험상수이다.)

5.1.2 Modeling

Injector에서 해석부는 Fig 9의 (a)와 같으나, 실제 해석에 적용된 model은 분공하나만을 나타내었다. Fig. 9의 (b)는 분공하나만을 modeling한 symmetry(5-hole : 1/5, 6-hole : 1/6) model이다.



(a) Real model (b) Symmetry model

Fig. 9 Applied model in analysis

Fig. 9의 (b) symmetry model은 해석부의 nozzle이 상호 대칭적이기 때문에 symmetry를 적용하였다.

## 5.2 분공수에 따른 압력과 속도

### 5.2.1 5hole과 6hole 노즐 인젝터의 130MPa 유동장

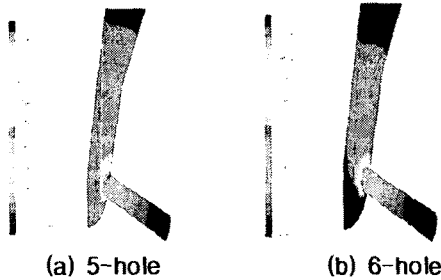


Fig. 10 Contour of static Pressure

Fig. 10은 내부압력이 1300bar인 상태에서의 내부압력장을 나타낸 것이다.

(a)와 (b)에서 알 수 있듯이 5-hole이 6-hole보다 nozzle 입구부근의 압력강하가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 5-hole의 경우가 6-hole의 경우보다 압력장이 안정화되어 있음을 알 수 있다.

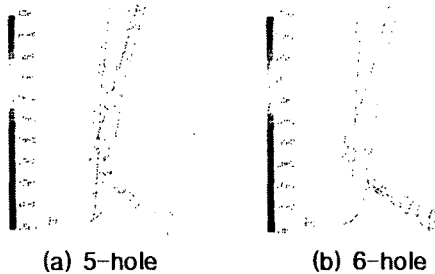


Fig. 11 velocity vectors colored by velocity magnitude

Fig. 11은 내부압력이 1300bar에서의 내부 속도분포를 나타낸 것이다.

(a)와 (b)의 데이터를 비교하였을 때 5-hole이 6-hole보다 nozzle 부에서 더 높은 속도분포를 보임을 알 수 있다. 이는 Fig 10에서 결과를 유추해 볼 때 압력강하가 큰 부분에서 속도가 높게 나타남 알 수 있었다.

## 6. 결론

고압 분사용 커먼레일 적용 인젝터의 구동방식 별로 사전분사(pilot injection)에 의한 분무 특성을 실험 및 이론적으로 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

실험적 해석에서는

1) 사전분사내 분무발달과정시, 전기적 구동방식과는 관계없이 일정한 거의 비례적인 분사깊이와 분사각을 형성하였지만, solenoid B 인젝터에서는 비대칭적인 발달을 하였다.

2) 솔레노이드 인젝터에 있어서, 비대칭적 분무발달을 보인 solenoid B 인젝터에서 빠른 분무속도와 낮은 분무각을 형성하였으며, 전류상승시간의 차이보다는 비대칭적인 발달의 영향에 의한 것으로 보인다.

3) 솔레노이드 인젝터에 비해 피에조 인젝터에서 빠른 분무속도를 보였으며, 전기적 응답성의 차이에 비롯됨을 알 수 있었다.

4) 솔레노이드와 피에조 인젝터 모두 온도가 증가할수록 분무각도 증가함을 알 수 있었다.

이론적 해석에서는

5) 5-hole과 6-hole의 고압조건에서 nozzle 내부 유동장을 수치해석에 의해 유추해 볼 때 5-hole이 6-hole보다 높은 속도분포와 압력강하를 보임을 확인할 수 있었다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- [1] M.Jansons, S. Lin, D. S. Choi, S. Campbell and K. T. Rhee, "Study of High-Pressure Injection DI Diesel Engine", SAE Paper 1999-01-3494, 1999.
- [2] Shuji Kimura, Osamu Aoki, Hiroshi Ogawa, Shigeo Muranaka and Yoshiteru Enomoto, "New Combustion Concept for Ultra-Clean and High-Efficiency Small DI Diesel Engines", SAE Paper 1999-01-3669, 1999.
- [3] 성경훈, "HSDI Common-rail 인젝터 모델링 및 니들 변위 추정에 관한 연구", 자동차 공학회지, 한국 자동차 공학회, p59-61, 2002
- [4] C. Pettes and A. Leipertz, "Potentials 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 2001-01-3499, 2001
- [5] H. Y. Kim, J. Y. Koo, H. K. Na and C. S. Kim, "Simulation of High Pressure Common-rail Fuel Injection System", SAE Paper 98370111, 1998.