커먼레일 고압분사용 인젝터의 분공수 및 니들구동특성이 Pilot 분무에 미치는 영향

Effect of Injection Hole and Needle-driven Characteristics on Pilot Spray in High Pressure Injector with Common-rail System

이 진 욱*, 배 장 웅**, 김 하 늘***, 강 건 용*, 민 경 덕****
Jinwook Lee, Jangwoong Bae, Hanul Kim, Kernyong Kang, Kyungduk Min

Abstract

Future exhaust emission limits for diesel-driven passenger cars will force the automotive company to significantly develop of the new technologies of diesel engine respectively of the drive assemblies. As we know, the contributions of soot and nitrogen oxide is the main problems in diesel engine. Recently, as a result, the pilot injection of common-rail fuel injection system recognizes an alternative function to solve an environmental problem.

This study describes the effect of the nozzle structure and driven characteristic of injector on pilot injection for a passenger car common-rail system. The pilot spray structure such as spray tip penetration, spray speed and spray angle were obtained by high speed images, which is measured by the Mie scattering 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 injector for common-rail system to know the condition of initial injection at experiment test. It was found that solenoid-driven injector with 5-hole was faster than 6-hole injector in spray speed at same conditions and piezo-driven injector showed faster response than solenoid injector.

주요기술용어 : Common-rail Fuel Injection System(커먼레일 연료 분사 시스템), Pilot Injection(사전분사), Solenoid Injector(솔레노이드 인젝터), Piezo Injector(피에조 인젝터)

1. 서 론

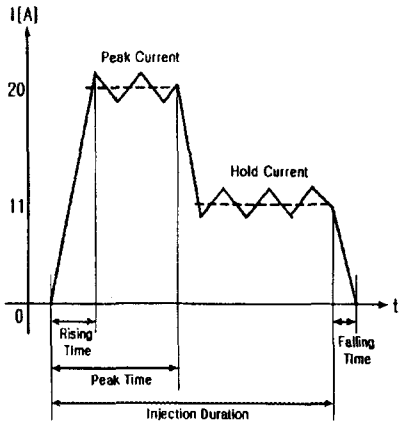
최근, 연료경제성과 CO_2가스 배출량 규제등으로 인하여 직접 분사식 디젤 엔진이 주목을 받고 있으며, 이러한 엔진의 성능 향상을 위하여 엔진내의 유동장과 분사계의 최적화는 필수적이다. 커먼레일(common-rail)을 적용한 초고압 직분식(direction injection) 디젤엔진은 이와 같은 환경 규제에 대응하기 위한 대안으로 여겨지고 있는 첨단 디젤엔진이며, 가솔린 엔진에 비해 연료절감 및 CO_2 배출감소 효과가 큰 것으로 알려져, 이에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2]. 이러한 디젤 엔진에 적용되는 커먼레일 시스템의 특징인 Pilot 분사는 연소압력의 증가나 주분사 착화지연의 감소 효과가 있어, 소음저감, 연료소비율, 배기 가스 저감의 효과적인 방법으로 인식되고 있다[3]. 따라서 본 연구에서는 주분사(main injection) 이전에

* 한국기계연구원, 청정동력기계그룹
** 충남대학교, 기계공학과 대학원
*** 명지대학교, 기계공학과 대학원
****서울대학교, 기계항공공학부

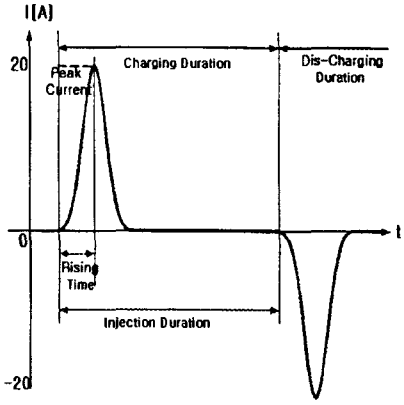
소량의 연료를 분사하는 사전분무(pilot spray)를 수행하는 커먼레일 분사시스템에서 솔레노이드(solenoid)방식 인젝터의 분공수와 구동방식을 피에조 방식 인젝터와 비교시험함과 동시에 연료온도에 따른 인젝터 구동특성이 사전분무에 미치는 영향을 해석하였다.

2. 고압분사용 인젝터의 구동특성

현재 상용화되어 있는 고압 분사용 인젝터로는 솔레노이드 방식이 주를 이루고 있다. 솔레노이드는 공극에서 발생하는 자기력으로 전기에너지를 기계에너지로 변환하는 장치를 의미하는데, 인젝터에 있어서 전기를 가하면 니들이 올라가면서 가압된 연료를 분사시키도록 되어 있다. Fig. 1(a)은 솔레노이드 구동방식의 인젝터 전류 파형을 나타낸 것으로, Peak and Hold 방식으로 전류를 제어하고 있으며, 피크 또는 홀드 전류시간, 전류 상승 시간등의 제어를 통한 다양한 니들구동이 가능하나, 이의 실제 적용은 어려운 실정이다. 이러한 솔레노이드 구동방식과 더불어 최근 다단분사(multiple injection)의 고정도 제어를 위하여, 피에조 스택(piezo stack)을 채용한 인젝터가 개발되어 소형엔진에 적용되고 있다. 피에조 인젝터의 기본적인 원리는 피에조 스택에 전압을 가하면 극과 극의 크기에 따라 스택의 길이가 변하는 역압전 효과(inverse piezo-electric effect)를 이용한 것이다(Fig. 2 참조)[4]. Fig. 1(b)는 피에조 구동방식 인젝터의 전류파형을 나타낸 것으로, 충전(charging)과 방전(discharging)방식으로 전류를 제어하고 있으며, 피에조 스택에 가해지는 전압과 전류의 제어를 통해 피에조 스택의 길이가 가변되게 된다. 일반적으로 피에조의 응답성이 솔레노이드에 비해 빠르기 때문에 커먼레일 분사시스템의 주 특징인 다단분사에 유리하다[5].



(a) Solenoid-driven type



(b) Piezo-driven type

Fig. 1 Current wave of common-rail injectors

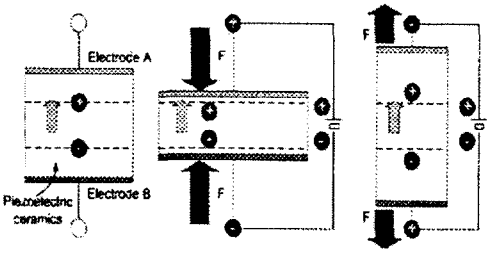


Fig. 2 Inverse piezo-electric theory

3. 실험적 연구

3.1 실험 장치

3.1.1 실험장치 구성

커먼레일 시스템에서 인젝터의 특성 실험을 위한 실험장치는 크게 고압연료 시스템, 분무가시화 시스템으로 Fig. 3과 같이 구성하였다.

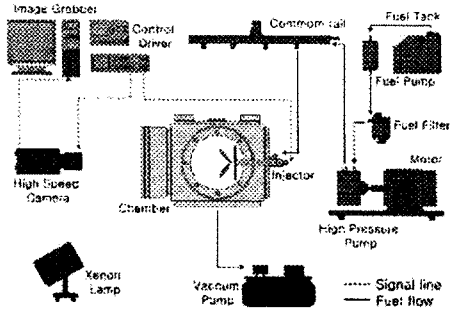


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

3.1.2 고압 연료시스템

커먼레일내 고압연료를 저장하기 위하여 상용 자동차용 엔진에 적용되는 고압펌프를 사용하여 200MPa까지 가압할 수 있었으며, 본 실험에서는 최대 3.7kW(60Hz, 2000rpm)출력을 발생시키는 DC 모터에 의해 구동되게끔 직렬로 장착하였다. 커먼레일 시스템은 배기량 2.0ℓ급 디젤엔진에 적용되는 시스템을 2대로 적용하였다. 이러한 고압연료는 인젝터를 통해 분사되는데, 분사기간 및 분사압력은 별도의 인젝터 드라이버(TDA 3200H)를 사용하여 제어되도록 하였다. 이후 분무실로 분사된 연료는 배기펌프(680mmHg)를 통해 순간적으로 분무실을 빠져나가도록 구성하였다.

3.1.3 분무 가시화시스템

분무 가시화를 위한 분무실 챔버의 크기는 350(L)×320(B)×250(H)㎜이며, 챔버의 수직면에 인젝터 어댑터를 설치하였다. 분무현상을 관측하기 위해 설치한 창(window)은 직경 200㎜, 두께 20㎜의 석영(quartz)으로 제작하였다. 이미지 획득을 위해 50,000fr/s인 High Speed Camera(Phantom v7.0)를 사용하였으며, 광원으로는 제논램프(출력 2kW)를 이용하였다. Pilot 분사와 카메라 촬영의 동기화를 위해 Pulse generator(DG 535)를 이용하여 고속의 이미지를 획득하였다.

3.2 실험 방법

Table 1 Specification for injectors

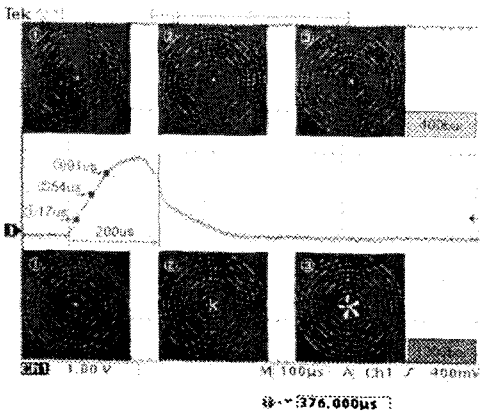
Injector		Hole number	Peak Current (A)	Hold Current (A)	Rising Time (μs)	Lift (㎜)
Solenoid	A	5	22	12	160	0.2
	B	6	22	12	160	0.2
Piezo		5	7	-	70	0.2

고압 디젤 엔진용 인젝터들에 대한 pilot 분무 특성을 해석하고자, 상용 2.0ℓ급 직분식 디젤엔진의 분사맵(injection map)을 기준으로 하여 실험 조건을 설정한 후, 각 인젝터별로 실제 연소실내 벽면과의 충돌을 배제한 자유 분무에 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 연료분사기간은 상용 엔진의 사전분사 기간인 200μs으로 하였다. 실험에 적용한 고압 분사용 인젝터로, 솔레노이드 인젝터는 상용화 인젝터이고, 피에조 인젝터는 상용 솔레노이드 인젝터와 니들부를 공유하며 7A의 전기적 용량을 가진 Prototype이다. Table 1은 실험에 적용한 인젝터의 제원을 나타낸 것이다.

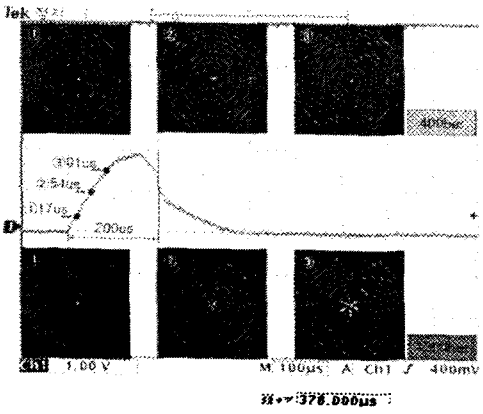
3.3 실험 결과

3.3.1 분무 발달과정

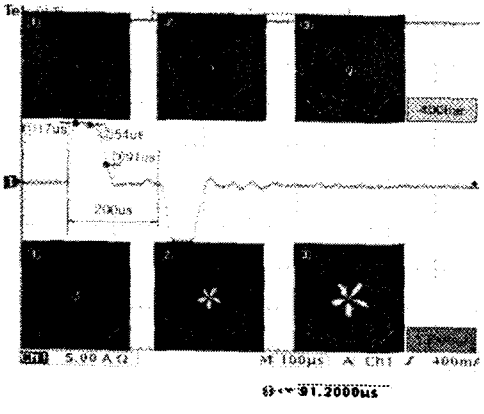
고압 분사용 인젝터로부터 분사되는 고압연료의 분무에 대한 특성을 해석하기 위하여, 동일한 조건하에서 3회 반복측정하여 분무 발달 과정을 비교하여 분석하였다. Fig. 4는 3개의 인젝터를 분사압력을 130MPa인 조건하에서 사전 분사 기간을 200μs로 설정하여 카메라 노출시간을 37μs로 하여 촬영한 초기 분무발달 과정이다. 고압 사전분사가 진행되는 동안 3가지 인젝터 모두 거의 비례적인 분사길이와 분사각을 형성하면서 분무가 형성되어 발달되었다. 분무 이미지에 보듯이 분공수와 구동방식에 따라 분무발달의 정도가 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Solenoid(A) injector

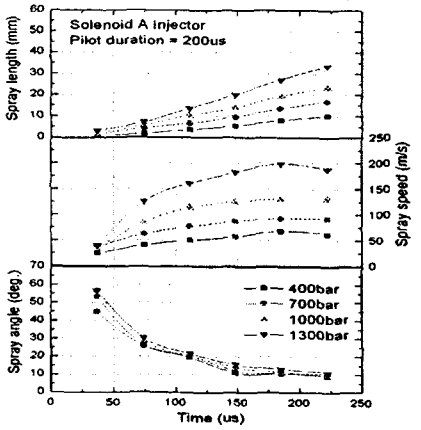


(b) Solenoid(B) injector

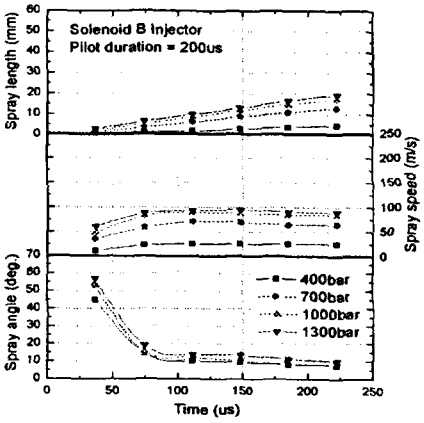


(c) Piezo injector

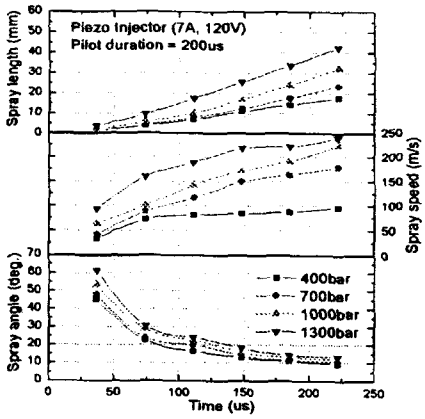
Fig. 4 Image of pilot spray for different injectors



(a) Solenoid(A) injector



(b) Solenoid(B) injector

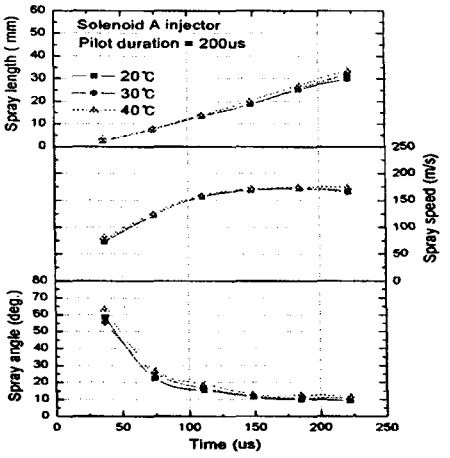


(c) Piezo injector

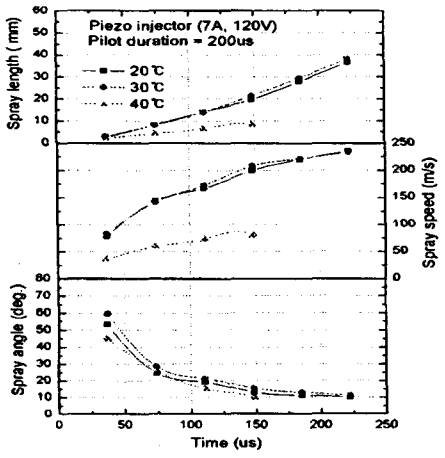
Fig. 5 Comparison of different hole number for solenoid injector

3.3.2 분공에 따른 인젝터 특성

Fig. 5(a)와 (b)는 동일한 솔레노이드 방식 인젝터에 있어 분공수가 다른 경우에 대해 압력의 증가에 따른 분무 도달거리, 분무선단의 속도, 분무각을 나타낸 것이다. 두 인젝터 모두 압력이 증가함에 따라 분무속도와 분무각은 비례적으로 증가함을 보였으며, 분공수가 6개인 경우에 비해 5개인 인젝터에서 빠른 분무선단의 속도와 큰 분무각을 나타내었다.



(a) Solenoid(A) injector



(b) Piezo injector

Fig. 6 Comparison of different driven injector

3.3.3 니들구동에 따른 인젝터 특성

Fig. 5(b)와 (c)는 5개의 분공을 가진 솔레노이드와 피에조 구동방식 인젝터에 대해 압력의 증가에 따른 분무 도달거리, 분무선단의 속도, 분무각을 나타낸 것이다. 피에조 인젝터가 솔레노이드 인젝터에 비해 50~100%의 높은 분무선단의 속도를 나타내고 있으며, 분무각에 있어서는 비슷한 경향을 나타내었다. 이는 전류상승 시간이 짧아짐으로 니들의 움직임이 빠름을 알 수 있다.

3.3.4 연료 온도에 따른 인젝터 특성

Fig. 6은 솔레노이드와 피에조 인젝터에 대하여 연료 온도별로 분무 도달거리, 분무선단의 속도, 분무각을 나타낸 것이다. 두 인젝터 모두 온도가 증가할수록 분무선단의 속도는 비슷한 값을 나타냈으며, 분무각에 있어서는 상대적으로 증가하였다. 하지만 피에조 인젝터에 있어서 연료온도가 40℃에 이르자 분사가 잘 이루어지지 않았는데, 이로 인해 인젝터 작동을 위한 연료온도의 한계구간이 존재함을 알 수 있었다.

4. 이론적 연구

4.1 수치 해석 방정식 및 모델링

이론적 연구에서는 전산유체역학을 이용하여 인젝터 내부 노즐과 sac volume에서 형성되는 유동장과 압력장등을 통해 연료의 인젝터내에서의 3차원적인 연료거동을 고찰하고자 하였다. 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 κ-ε 난류모델을 사용하였다[6].

(1) 연속방정식

$$\partial/\partial x_i(u_i) = 0$$

(2)운동량방정식

$$\partial/\partial x_i(u_i u_i) = -\partial p/\partial x_i + \partial x_j[\mu_{eff}(\partial u_i/\partial x_j + \partial u_j/\partial x_j)]$$

(3)난류에너지 방정식

$$\partial/\partial x_i(\rho u_i k) = \partial/\partial x_i(\sigma_k \mu_{eff} \partial k/\partial x_i) + G_t \rho\epsilon$$

(4)난류에너지 소산율 방정식

$$\partial/\partial x_i(\rho u_i \epsilon) = \partial/\partial x_i(\sigma_\epsilon \mu_{eff} \partial\epsilon/\partial x_i) + C_1\epsilon\epsilon/k G_t - C_2\epsilon\rho\epsilon^2/k - R$$

(5)RNG κ-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.)

인젝터에서 해석부 모델링은 Fig. 7과 같으며, 실제 해석에 적용된 모델은 해석부의 노즐이 상호대칭적이기 때문에 symmetry를 적용하여 단일 분공에 대한 해석을 하였다.

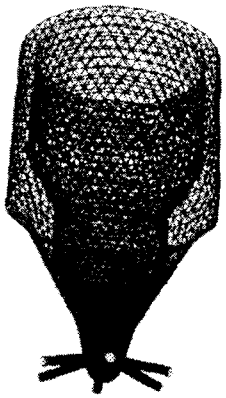
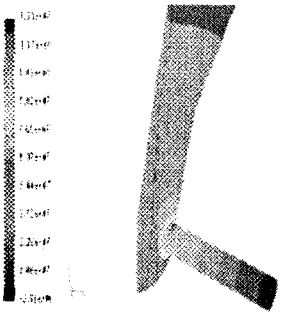


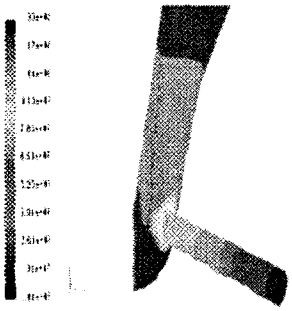
Fig. 7 Applied model in analysis

4.2 수치 해석 결과

Fig. 8은 내부압력이 1300bar인 상태(needle full lift state)에서의 내부 압력장을 나타낸 것이다. (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 5-hole이 6-hole보다 노즐 입구부근의 압력강하가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 5-hole의 경우가 6-hole의 경우보다 압력장이 안정화되어 있음을 알 수 있다.

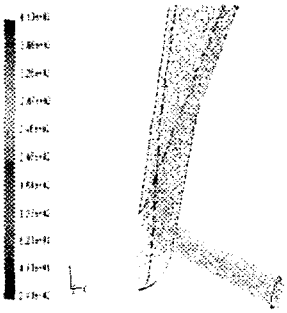


(a) Solenoid(A) injector

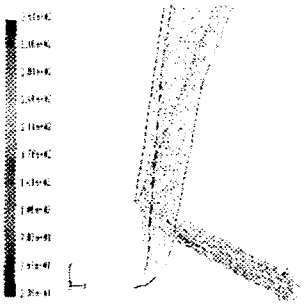


(b) Solenoid(B) injector

Fig. 8 Contour of static pressure



(a) Solenoid(A) injector



(b) Solenoid(B) injector

Fig. 9 Velocity vectors colored by velocity magnitude

Fig. 9는 내부압력이 1300bar에서의 내부 속도분포를 나타낸 것이다. (a)와 (b)의 데이터를 비교하였을 때 5-hole이 6-hole보다 노즐부에서 더 높은 속도분포를 보임을 알 수 있다. 이는 Fig. 8에서 결과를 유추해 볼 때 압력강하가 큰 부분에서 속도가 높게 나타남을 알 수 있었다.

5. 결 론

커먼레일 고압 분사용 인젝터의 분공수 및 서로 다른 니들구동 방식에 따른 고압 Pilot 분무에 대하여 실험 및 이론적으로 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

실험적 해석결과로는

1) 사전분사내 분무 발달 과정은 압력이 증가함에 따라 거의 비례적인 분사길이와 분사각을 형성하면서 발달됨을 알 수 있었다.

2) 솔레노이드 구동방식 인젝터의 경우, 분공의 수가 5개인 인젝터가 6개인 인젝터에 비해 빠른 분무속도와 큰 분무각을 나타내었는데, 이는 상대적으로 큰 분공 직경과 분무속도에 기인한 것으로 보여진다.

3) 피에조 구동방식 인젝터는 솔레노이드 구동방식 인젝터와 거의 비슷한 분사각을 형성하면서 1.5~2배 빠른 분무선단의 속도를 나타내었다. 이는 상대적으로 빠른 전류상승 시간에 의한 니들 응답성의 증가로 나타난 결과로 판단된다.

4) 인젝터 구동방식에 관계없이 연료온도가 증가할수록 분무각은 증가하였으며, 피에조 인젝터의 경우, 사용 연료온도의 한계구간이 존재함을 알 수 있었다.

이론적 해석결과로는

5) 1300bar의 초기 고압조건과 전 니들 양정(full needle lift)인 경우, sac 체적과 분공 체적내에서의 유동장을 수치해석한 결과, 상대적으로 5-hole 인젝터가 6-hole 인젝터보다 높은 속도분포와 압력강하를 보임을 확인할 수 있었다. 이는 실험결과와도 일치한다.

후 기

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

참 고 문 헌

1) M. Jansons, S. Lin, D. S. Choi, S. Campbell, and K. T. Rhee, "Study of High-Pressure Injection DI Diesel Engine", SAE 1999-01-3494, 1999.

2) S. Kimura, O. Aoki, H. Ogawa, H. Muranaka, and Y. Enomoto, "New Combustion Concept for Ultra-Clean and High-Efficiency Small DI Diesel Engines", SAE 1999-01-3669, 1999.

3) 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 1999-01-3669, 1999.

4) D. P. Chun, J. S. Lim, S. Y. Ahn, H. S. Kim, S. J. Shin, and W. J Yoo, "Piezo Injector Driving Circuit in Diesel Common-Rail System", KSAE, pp. 391~396, 2003.

5) C. Fetters, and A. Leipertz, "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 200-01-3499, 2001.

6) 성경훈, "HSDI Common-rail 인젝터 모델링 및 니들 변위 추정에 관한 연구", 자동차 공학회지, 한국 자동차 공학회, p59-61, 2002.