

커먼레일 디젤기관용 피에조 인젝터 그룹홀 노즐의 분무 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Spray Characteristics of Piezo Injector Group-hole Nozzle for Common Rail Diesel Engine

성 기 안

K. A. Sung

(접수일: 2008년 5월 21일, 수정일: 2008년 9월 18일, 채택확정: 2008년 9월 22일)

Key Words : Stoichiometric Diesel Combustion(Stoichiometric 디젤 연소), Piezo Injector(피에조 인젝터), Group-hole Nozzle(그룹홀 노즐), SMD(평균입경), ROI(분사율)

Abstract : In order to meet stringent future emission regulations, especially to reduce Particulate Matter (PM) and NO_x, stoichiometric diesel combustion technology with a piezo group-hole nozzle injector is being researched for reduction harmful emissions. A new nozzle layout, namely a group-hole nozzle, which has one group of small orifices with a wide spray included angle was investigated to improve the efficiency of stoichiometric diesel combustion. From this point of view, the group-hole nozzle suggested by Denso Co. is an attractive candidate method applicable to stoichiometric diesel combustion. The group-hole nozzle concept is to reduce the injector nozzle hole diameters without sacrificing spray penetration by closely locating two holes. Experimental studies have proven that the spray from group-hole nozzles have similar spray penetration to that of a single hole with equivalent overall nozzle hole area, but the spray drop sizes (SMD) are reduced, aiding vaporization and mixing.

1. 서 론

지구 대기환경에 대한 관심이 고조됨에 따라 자동차 기관의 배출가스에 대한 각국의 배기가스 규제 (Euro V, Tier2 bin8 등)가 매우 강화되고 있고, 이러한 엄격한 규제를 만족시키기 위해 여러 가지 기술 들이 개발되고 있다. 디젤기관으로부터 배출되는 대표적인 유해물질은 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO), 탄화수소(HC), 질소산화물(NO_x) 및 입자상 물질(PM)들이며, 이들은 DOC(Diesel Oxidation Catalyst), DPF(Diesel Particulate Filter) 및 SCR(Selective Catalytic Reduction)과 같은 여러 가지 후처리 촉매장치를 사용하여 어느 정도 저감시킬 수 있지만, 연소과정에서 발생하는 유해물질을 원천적으로 저감시키는 엔진 연소기술 또는 전처리 기술의 연구개발 및 실차 적용이 큰 이슈로 부각되고 있다.¹⁾

일반적으로 NO_x의 배출은 연소가스의 온도에 큰 영향을 받으므로, 디젤기관의 예혼합 연소구간에서 국부적으로 존재하는 높은 온도의 화염영역에서 고농도의 NO_x가 생성된다. 이에 반하여 PM은 실린더 내로 직접 분사되는 연료 주위에 공간적으로 불균일한 공연비 분포가 발생되어 이때 생긴 농후한 영역에서 많은 양이 발생된다고 알려져 있다. 즉, NO_x와 PM의 생성과정은 서로 상반관계(Trade-off)에 있으므로, 두 성분의 동시 저감은 상당히 어려운 과제이다.

이와 같은 디젤기관의 NO_x와 PM의 동시 저감 요구를 만족시키기 위하여 최근 수행되고 있는 연료 분사에 관한 새로운 분무 및 혼합기 형성 방법으로 초고압 연료분사와 그룹홀 노즐 적용 및 혼합기 분배 최적화(분사율 제어, 예혼합기 공급) 등이 연구되고 있다.²⁾

초고압 (200MPa) 피에조 인젝터의 연료 분무를 적용한 Stoichiometric 디젤 연소기술은 NO_x의 생성 억제와 PM의 저감을 동시에 이룰 수 있는 새로운 연소기술로 떠오르고 있다. 아직까지 국내에서는 이러한 엔진 연소기술에 관한 연구가 활발하게 진행되

성기안(책임저자) : 강원도립대학 자동차과
E-mail : kiansung@empal.com Tel : 033-660-8262

고 있지는 않지만, 미국 DOE (Department of Energy)와 전 세계 26개 자동차 완성차 및 부품 업체의 협력지원을 받는 위스콘신 주립대학교 (UW-Madison) ERC (Engine Research Center)의 DERC (Diesel Emissions Reduction Consortium)에서는 매년 이와 관련된 많은 논문과 연구실적들을 발표하고 있다.³⁾

Denso Co.에서 2006년에 발표한 2세대 커먼레일 시스템 (2nd CRS)은 Euro IV 규제 만족을 위하여 180 MPa 커먼레일 압력 및 피에조 인젝터를 도입하였다.⁴⁾ 본 연구는 Denso Co.가 2009년 발표예정인 3세대 커먼레일 시스템 (3rd CRS) 중 피에조 인젝터의 그룹홀 노즐에 관한 분무 특성에 관하여 여러 가지 실험 및 분석을 통하여 디젤기관의 유해물질 저감 전처리 기술인 Stoichiometric 디젤연소의 가능성을 검토하고자 한다.

2. 선행연구 도입

2.1 Denso Co.의 2세대 커먼레일 시스템

Fig. 1은 Denso Co.의 2세대 180MPa 피에조 커먼레일 시스템의 간략화된 구성도를 보여준다. 연료 탱크로부터 이송된 연료는 압축펌프 (HP3)의 펌핑 챔버로 유입되어 듀티비(250Hz)로 제어되는 SCV (Suction Control Valve)를 통하여 커먼레일 압력 (Max. 180MPa) 까지 상승된다. 커먼레일은 레일 내부의 연료압력 검출용 압력센서와 과도한 압력 상승을 방지하기 위한 압력 릴리프밸브(195MPa Upper Limit Pressure)가 장착되어 있다. 여러 가지 센서로부터 다양한 정보를 바탕으로 분사 연료조량, 분사시간 및 분사횟수들은 전자제어유닛(ECU)에 의해 정확하게 제어되고, 인젝터 구동신호(TTL 레벨)를 발생시킨다.

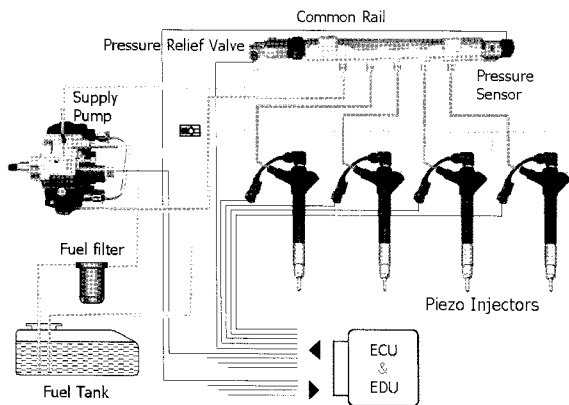


Fig. 1 Denso's 2nd generation 180Mpa piezop CRS

발생된 인젝터 구동신호는 EDU(Electronic Injector Driver Unit)로 입력되어, 피에조 스택 (Piezo Stack)을 구동시킬 수 있는 고전압으로 승압되어 인젝터를 직접 구동시킨다.⁴⁾

2.2 피에조 인젝터의 특성

Denso 2세대 CRS에 적용된 피에조 인젝터의 특성은 기존의 솔레노이드 방식보다 다음과 같은 장점을 갖도록 설계되었다.^{4,5)}

- 짧은 분사시간을 위한 빠른 노즐 동작 속도.
- 초고압(180MPa) 상태에서 정밀하고 빠른 분사.
- 강한 니들 흡입력 발생을 위한 우수한 피에조 스택 변형 신뢰도.

Fig. 2는 피에조 인젝터의 구성과 압력평형 제어밸브(Pressure-balanced Control Valve)의 구조를 보여주며, 인젝터 바디, 피에조 스택, 흡입력 전달 통로, 제어밸브 및 노즐 등으로 크게 구성 되어 있다.

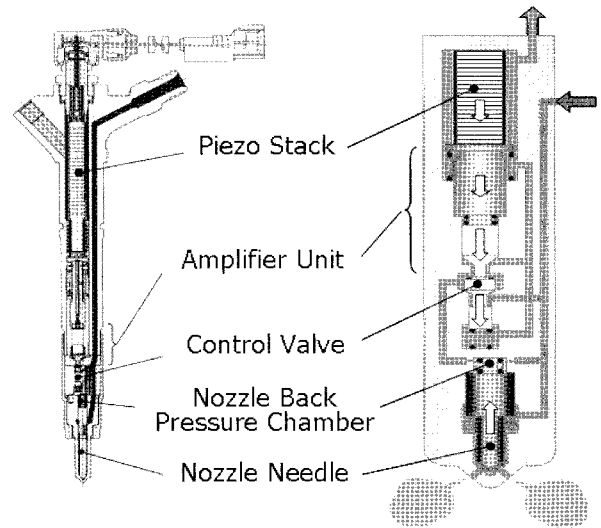


Fig. 2 Configuration of piezo injector^{4,5)}

Fig. 3은 레일압력 180MPa 및 유량 80mm³/st 조건에서 Denso 2세대 CRS와 재래식 솔레노이드 인젝터의 구동신호, 제어밸브 이동량, 노즐 니들 이동량을 비교 도시하였다. 피에조 인젝터는 제어밸브 반응과 니들 동작속도에서 솔레노이드 인젝터 보다 명확하게 향상된 성능을 보여준다. 또 다른 장점은 낮은 구동력에 의해 동작되는 제어밸브는 짧은 시간 안에 다수의 분사를 가능하게 하며, 낮은 에너지 소비로 디젤 엔진의 연소 사이클당 최대 5회의 분사횟수를 발생시킬 수 있다.⁴⁾

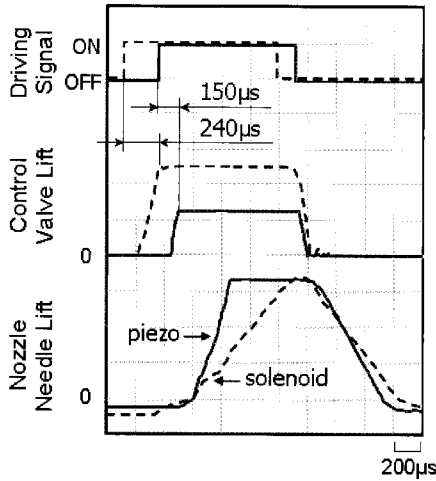


Fig. 3 Characteristics of nozzle needle lift

3. 실험장치 구성 및 실험적 접근

3.1 그룹홀 노즐의 개념

Fig. 4는 그룹홀 노즐(Group-hole Nozzle)의 기본 개념을 도시하였으며, 그룹홀 노즐의 총 노즐홀 단면적은 싱글홀 노즐의 그 단면적과 동가이다. Fig. 5는 분무압력 80MPa, 분사량 25mm³/st, 분위기 압력 5MPa, 및 분위기 온도 600°C에서 동가의 홀 단면적을 갖는 그룹홀 노즐과 재래식 싱글홀 노즐들의 LIEF(Laser Induced Exciplex Fluorescence) 계측 방법으로 획득한 연료분무의 가시화 영상이다.⁸⁾

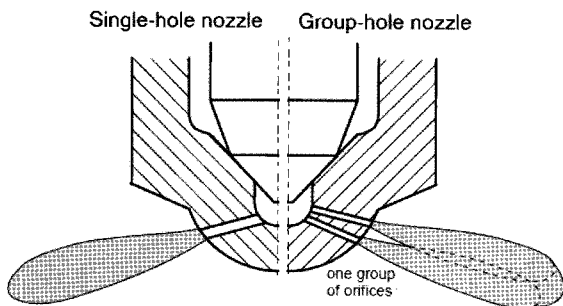


Fig. 4 Concept of group-hole nozzle compared to conventional nozzle

일반적으로 분무 액적의 평균입경(SMD, Sauter Mean Diameter)은 홀 직경이 작아질수록 작아지는 경향이 있지만, 그러나 다수의 작은 직경의 홀만으로 강한 관통력(Penetration)을 갖는다고 말하기는 어렵다.⁶⁾ 따라서 그룹홀 노즐의 설계 개념은 하나의 노즐에서 작은 직경의 홀 들을 조합하여 작은 연료 액적 생성과 동시에 넓은 분무각과 강한 관통력을 확보하여 이러한 문제를 극복하는데 있다. 그러므로

그룹홀 노즐을 이용한 Stoichiometric 디젤연소 기술은 공기 혼합을 효율적으로 향상시키고 예혼합 연소에 필요한 이상적인 연소실내에 균일 희박 예혼합기를 형성시켜 NO_x의 생성 억제와 PM의 저감을 동시에 이룰 수 있는 새로운 연소기술로 평가 받고 있다.^{1,7)}

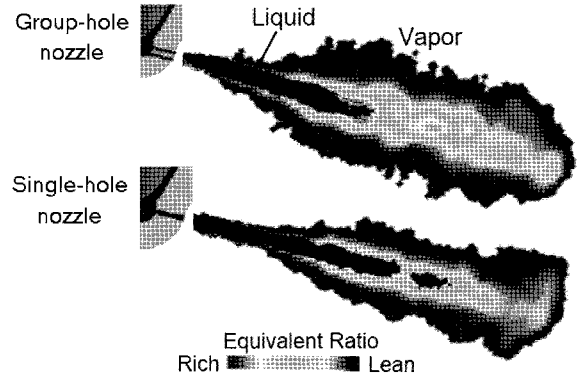


Fig. 5 Fuel spray observation⁸⁾

3.2 연료액적의 평균입경 계측

Fig. 6은 디젤 연료의 분무 입경을 계측하기 위한 위상 도플러 입자 분석장비인 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) 시스템의 구성도이다. PDPA 시스템은 고압분사 시스템, 전송부(Transmitter), 검출부(Receiver)와 신호 처리 부분으로 구성되고, 광원으로는 수냉식 최고출력 5W의 Ar-ion 레이저(Coherent, Innova 70C)가 사용되었다. 광원으로부터 나오는 레이저 빔은 브락셀(Bragg Cell)과 빔 분리기를 통과하여 40MHz의 주파수 편이를 가지는 각각 2개의 편이빔(Shifted Beam)과 무편이빔(Unshifted Beam)으로 나누어지고, 이들 4개의 빔은 광케이블과 빔 전송부를 통하여 측정위치에 프린지를 형성한다.

이 때 연료의 액적이 측정점을 통과하면 검출부에 산란광이 검출되고, 측정되는 신호의 위상차와 도플러 신호의 주파수는 신호 처리계를 통하여 연료 액적의 입경 등과 같은 필요한 데이터를 실시간으로 취득하여 컴퓨터에 저장된다. 데이터의 출력율과 산란 등을 기준으로 하여 출력과 PMT(Photo-Multiplier Voltage)를 각각 700mW와 500V로 고정하였다. PDPA 시스템의 주요 제원은 Table 1과 같다.

또한 최소 10µm까지 제어 가능한 자동이송 시스템(ATS-300-3)을 적용하여 인젝터의 위치를 변경하면서, 각각의 인젝터 노즐에 대한 전영역 및 국소 위치에서의 평균입경(SMD)들을 계측하였다.

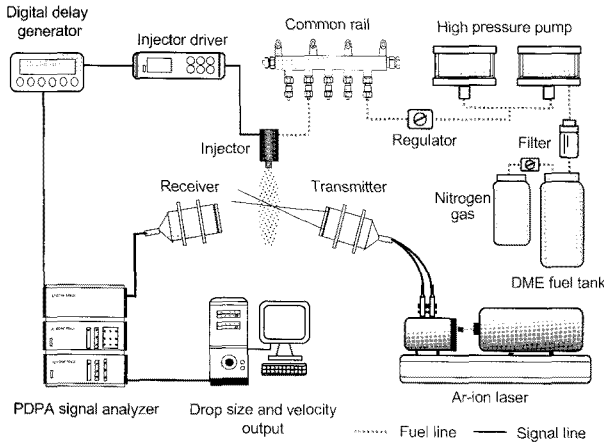


Fig. 6 Schematic diagram of PDPA system

Table 1 Layout of PDPA system

Laser output	Ar-ion, 5W(Max)
Wave length	514.5nm, 488nm
Laser beam diameter	1.4mm
Fringe number	36
Focal length	500nm (transmitter & receiver)
Collection angle	30°

3.3 연료 분사율 측정 장치

커먼레일을 이용한 고압 디젤 인젝터의 분사율(ROI, Rate of Injection)을 측정하기 위하여 Fig. 7 과 같은 분사율 장치를 구성하였다. 장치의 구성은 연료 공급 시스템, 신호 발생기, 데이터 취득 및 제어 시스템, 압력 용기 등으로 구성하였다.

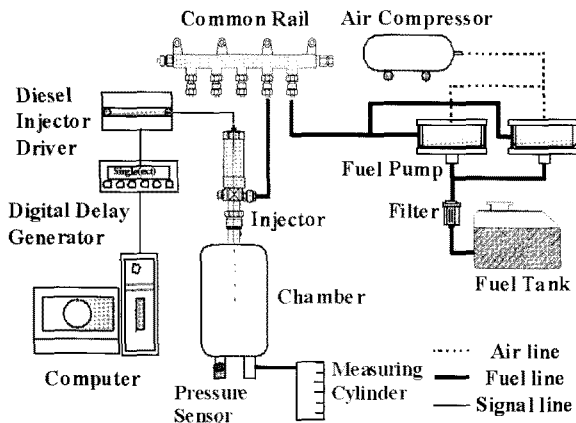


Fig. 7 Schematic diagram for rate of injection

연료 탱크로부터 연료 라인을 통하여 연료 공급 고압펌프를 거쳐 커먼레일에 축적된 고압 연료는

시험 인젝터로부터 용기에 공급된다. 이때 연료 분사는 고압 인젝터 구동회로 신호에 의하여 이루어지며, 분사와 아울러 압력 및 분사율 측정에 필요한 각종 데이터가 취득 및 분석된다.

3.4 실험 조건

Table 2, 3은 각각 실험에 사용된 피에조 인젝터(Denso Co. 시제품)의 규격 및 PDPA/ROI 실험 조건을 보여준다.

Table 2 Piezo injector characteristic

Hole type	Model	Hole dia. (μm)	Hole number	Included angle (deg)
Single	SHN1	128	8	130
	SHN2	90	8	130
Group	GHN1	90	8×2	130
	GHN2	100	6×2	130

Table 3 Experimental conditions

Test items	Injection pressure	Energizing time	Ambient condition
PDPA condition	80 MPa	$T_{ENG} = 0.3ms$	Room
ROI condition	150 MPa	$T_{ENG} = 0.3ms, 0.4ms, 0.5ms$	5 MPa

4. 실험결과 및 고찰

4.1 분무액적의 미립화 특성

디젤 고압용 그룹홀 노즐 및 싱글홀 노즐의 피에조 인젝터 각각에서 분사되는 연료의 미립화 특성을 조사하기 위하여 PDPA 계측 시스템을 활용하였으며 노즐 팁으로부터 분무중심 축방향 20mm부터 10mm 간격으로 하류 70mm까지 측정하였다. 또한 축방향 측정위치에서 분무중심축에 수직인 횡단면에서 반경방향으로 2mm 간격으로 이동하면서 국소부위 연료액적의 평균입경(SMD)을 계측하였다. 이때 전체 평균입경(Overall SMD) 계측 실험에서는 인젝터 구동시간($T_{ENG}=0.3ms$) 및 커먼레일의 분무압력($P_{INJ}=80MPa$)을 일정하게 유지시켰다.

Fig. 8은 인젝터 구동시간에 따른 각각의 인젝터에 대한 전체 평균입경을 나타내고, Fig. 9는 분무중심축에서 국소부위의 평균입경 및 반경방향 $Z=40, 60mm$ 에서 각각 국소부위의 평균 입경(Local

SMD)을 나타낸다.

싱글홀 인젝터 모델 SHN2(90 μ m hole dia.)가 모든 구동시간 영역에서 가장 작은 연료액적의 전체 평균 입경을 보여주지만, 축방향으로 인젝터 팁 근처에서는 그룹홀 인젝터 모델 GHN1(90 μ m hole dia., 8 \times 2 holes)이 가장 작은 국소 평균입경을 발생시켰다.

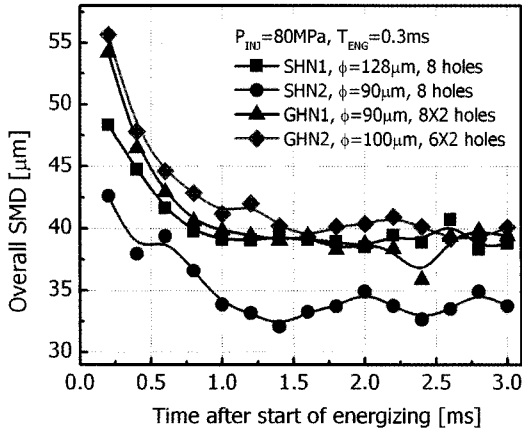
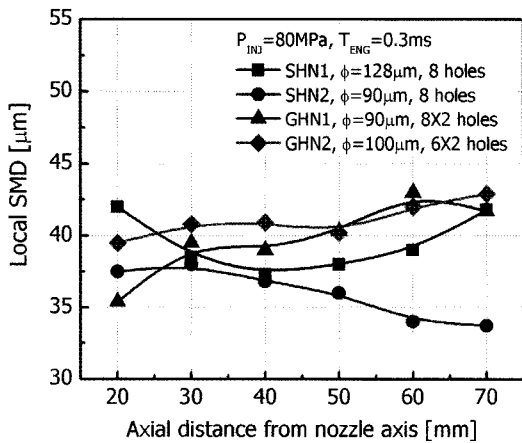
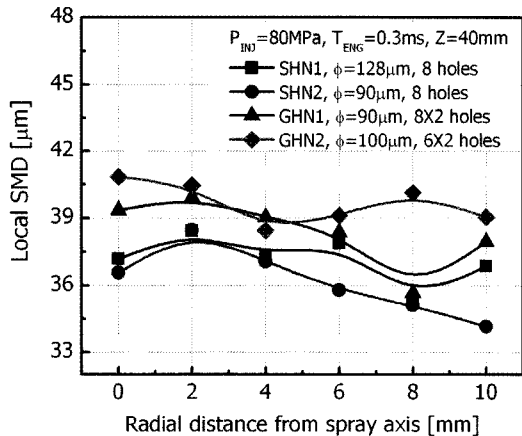


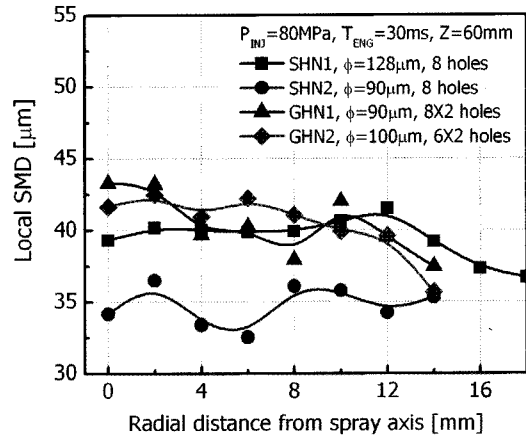
Fig. 8 Overall SMD characteristics



(a) Local SMD on axial direction



(b) Local SMD on radial direction (Z=40mm)



(c) Local SMD on radial direction (Z=60mm)

Fig. 9 Local SMD on axial and radial direction

20mm 이후에서는 그룹홀 노즐의 경우 국소 평균입경은 증가되는 경향을 보이는데 이것은 분무축 근처의 액적들의 흡착(Coalescence)에 의해 발생하는 현상이라고 추정되며, 싱글홀 노즐의 경우는 감소되는 패턴을 보였다. Fig. 5와 연동하여 관찰해보면, 비증발 분무조건에서는 그룹홀 노즐의 미립화 특성은 장점들을 많이 가지고 있지 않다고 판단된다.

4.2 분사율 (ROI) 특성

압력 5MPa로 일정하게 분위기 압력을 유지하면서, 각 인젝터당 분사압력 150MPa로 1000회 분사하여 평균 분사량과 분사율을 측정하였다.

Fig. 10은 인젝터 구동시간($T_{ENG} = 0.3, 0.4, 0.5$ ms)에 대한 평균 분사량을 나타내고, Fig. 11은 인젝터 구동시간($T_{ENG} = 0.3$ ms) 후 피에조 인젝터 내부의 콘트롤 밸브 동작에 따른 분사율을 보여준다.

총 노즐홀 단면적이 동일한 인젝터 모델 SHN1, GHN1, GHN2의 연료분사량은 각각의 인젝터 구동시간에 대해 유사한 분사량을 나타내지만, 다른 인젝터의 50% 총 노즐홀 단면적을 갖는 인젝터 모델 SHN2는 인젝터 구동시간($T_{ENG} = 0.3$ ms, 0.4ms, 0.5 ms) 각각에 대해 85%, 80%, 60%의 분사량을 보여주었다. 이러한 원인은 인젝터 내부 콘트롤 밸브의 구조적인 요소와 분무시 캐비테이션의 효과라고 추정된다.

그룹홀 GHN1의 분사율은 싱글홀 SHN1에 비해 약간 낮은 최대 분사율을 보이고 유사한 분사율 패턴을 보였지만, 인젝터 모델 SHN2의 최대 분사율은 SHN1의 56% 정도를 나타냈다.

인젝터 구동신호에 대한 실제 인젝터 구동시간은

SHN1과 GHN1의 경우 약 2.7배 및 SHN2의 경우 3.3배 증가되었다. 이러한 특징은 기존의 재래식 솔레노이드 인젝터와 비교하여 약 33%의 짧은 인젝터 구동시간으로 동일한 인젝터 작동시간을 확보함으로써, 연소 사이클 중 연료를 다분사 할 수 있는 장점을 갖는다.

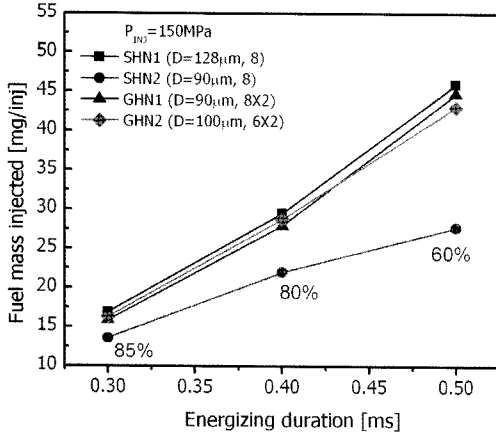


Fig. 10 Effect of injected fuel mass

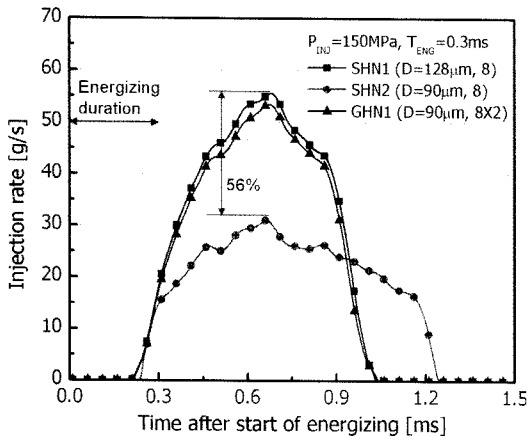


Fig. 11 Comparison of ROI tests

5. 결 론

디젤기관의 유해물질 저감 전처리 연소기술로 연구개발 되고 있는 Stoichiometric 디젤연소 시스템 중 피에조 인젝터의 그룹홀 노즐에 관한 분무 특성을 조사하기 위하여, PDPA 및 ROI 측정시스템을 활용하여 연료액적의 평균입경 및 연료 분사율 등을 실험적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 그룹홀 인젝터 모델 GHN1(90µm hole dia., 8×2 holes)은 인젝터 팁 근처에서 가장 작은 국소 평균입경의 연료액적을 발생시키며, 20mm 이후에서는 그룹홀 노즐의 경우 국소 평균입경은 보이는

데 이것은 분무축 근처의 액적들의 흠착에 의해 발생하는 현상이라고 추정된다.

2. 총 노즐홀 단면적이 동일한 인젝터 모델 SHN1, GHN1, GHN2의 연료분사량은 각각의 인젝터 구동시간에 대해 유사한 분사량을 보여주며, 그룹홀 GHN1의 분사율은 싱글홀 SHN1에 비해 약간 낮은 최대 분사율을 갖지만 분사율 곡선은 유사한 패턴을 보였다.
3. 피에조 그룹홀 노즐 인젝터는 기존의 재래식 솔레노이드 인젝터와 비교하여 약 33%의 짧은 인젝터 구동신호로 동일한 인젝터 구동시간을 확보함으로써, 연소 사이클 중 연료를 다분사 할 수 있으므로, Stoichiometric 디젤연소 기술에 적용 가능하다고 사료된다.

참고 문헌

1. S. Lee, 2006, "Investigation of Two low Emissions Strategies for Diesel Engines : PCCI and Stoichiometric Combustion", Ph.D. Thesis, UW-Madison, USA, pp. 1~15.
2. K. Nishida, S. Nomura, and Y. Matsumoto, 2006, "Spray and mixture properties of group-hole nozzle for D.I. Diesel Engine", Proceeding of ICLASS 2006, 06-171, pp. 1~7.
3. ERC, 2008, "Diesel Emissions Reduction Consortium", Newsletter, Vol. 4, No. 1, pp. 1~30.
4. M. Oki, S. Matsumoto, and Y. Toyoshima, 2006, "180MPa Piezo Common Rail System", SAE, 2006-01-0274, pp. 1~7.
5. K. Takeuchi, and T. Toyao, 2003, "Development of 2nd Generation Common Rail System", I-Mech EC610-013, pp. 1~6.
6. Y. Zhang, K. Nishida, and S. Nomura, 2003, "Spray Characteristics of Group-hole Nozzle for D.I. Diesel Engine", SAE, 2003-01-3115, pp. 1~10.
7. S. Park, and R. Reitz, 2007, "Modeling the Effect of Injector Nozzle Hole Layout on Diesel Engine", Proceedings of JRCICE 2007, 2007-40022, pp. 1~6.
8. Y. Nishijima, et al, 2006, "A Successful Approach to Reduce Emissions Using a Group Holes Nozzle", JSAE, Vol.11, No.1, pp. 29~34.