

고압 디젤 인젝터 노즐 홀 수가 연료 분무 및 배기 특성에 미치는 영향

전 문 수[†]

Effect of Nozzle Hole Number on Fuel Spray and Emission Characteristics of High Pressure Diesel Injector

Mun Soo Chon

Key Words: Spray characteristics(분무 특성), Nozzle hole number(노즐 홀 수), Clean diesel engine(클린디젤엔진)

Abstract

This paper presents effect of nozzle hole number on spray characteristics and engine performance. Experiments were conducted to measure spray penetration and SMD distributions using a spray visualization system and PDPA (phase Doppler particle analyzer) system. In addition, engine performance and emission characteristics were measured using a single cylinder engine and emission measurement systems. Results showed that 8-hole-injector exhibits improved spray performances. Furthermore, soot emission was decreased with 8-hole-injector, compared to that of 6-hole-injector.

1. 서 론

최근 자동차로부터 배출되는 이산화탄소의 발생을 억제하기 위한 고연비 차량에 대한 관심은 Euro-6와 같은 범 국가적 규제의 문제를 떠나 소비자에게는 실생활 문제로 인식되고 있어 이를 만족시키기 위한 기술적 노력이 절실히 요구되는 상황이다. 따라서 열효율 측면에서 상대적으로 유리한 디젤 자동차의 보급이 전 세계적으로 꾸준히 증가하고 있으며, 국내의 경우에도 커먼레일 방식의 연료 공급 시스템을 장착한 클린 디젤 자동차의 보급이 점차로 증가하고 있는 추세이다^(1,2).

클린 디젤 엔진은 약 1,350 bar의 연료 분사 압력을 적용한 커먼레일 시스템 및 솔레노이드 구동 방식의 인

젝터가 개발되면서부터 본격적으로 대중적 보급이 이루어지기 시작되었으며, 최근에는 인젝터 가공 기술의 발달로 약 2,000 bar 이상의 분사 압력에서 기존의 인젝터 노즐 홀 수를 8개로 증가시킨 서보 솔레노이드 방식 인젝터가 개발되어 Euro-6 및 Post Euro-6와 같은 보다 엄격한 연비 및 배기 규제를 만족시킬 수 있는 핵심 연소 기술의 기술적 토대가 어느 정도 이루어진 상태이다^(3,4).

그러나 2,000 bar 이상의 고압 연료 분사 시스템 적용은 실제 엔진 연소 시스템과 기술적 매칭이 이루어져야 가능한 기술이며, 이러한 기술적 매칭은 인젝터의 분무 특성, 연소 특성 및 배기 특성 등을 고려한 연소실 형상 최적화를 바탕으로 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 인젝터 노즐 홀 수의 변화에 따른 고압 디젤 인젝터의 클린 디젤 엔진 적용 가능성을 확인하고 연소실 형상 최적화를 위한 데이터를 확보하기 위하여 연료 분무 특성을 확인하고 인젝터 노즐 홀 수의 변화에 따른 엔진 연소 및 배기 특성을 실험적으로 규명하였다.

(2011년 월 일 접수 ~ 2011년 월 일 심사완료, 2011년 월 일 게재확정)

[†]한국교통대학교 에너지시스템공학과

E-mail : mschon@ut.ac.kr

TEL : (043)841-5292 FAX : (043)841-5280

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서는 먼저 서보 솔레노이드 및 피에조 방식의 고압 디젤 인젝터의 클린 디젤 엔진 적용성을 확인하고자 Bosch법을 이용한 분사율 측정 장치를 사용하여 연료 분사율 특성을 파악하였다⁽⁵⁾. 연료 분사율 측정 장치는 인젝터 관내의 압력파를 측정하는 압력 센서가 장착된 어댑터, 길이가 약 5 m인 측정관, 그리고 잔여 맥동을 감쇠하기 위한 압력 용기와 배압을 조절하고 유지시키는 압력 조절 밸브로 구성하였으며, 인젝터의 분사 신호와 압력 취득 신호를 동기화를 위한 인젝터 드라이버, 관내의 압력의 변화를 측정하기 위해 최고 200 bar 까지 측정할 수 있는 압력센서 및 등을 사용하여 연료 분사율 데이터를 취득하였다.

한편, 분무 발달 과정을 정량화하기 위한 가시화 시스템은 커먼레일 방식의 고압 연료 공급 장치, Nd:YAG 레이저를 광원으로 하는 고속 카메라, 분무 영상 취득 및 분석 장치 등으로 구성하였으며, 고속 카메라의 촬영 신호와 인젝터의 분사 신호는 디지털 함수 발생기를 이용하여 동기화하였다. 또한 인젝터는 인젝터 드라이버를 통해 원하는 조건에서 구동할 수 있도록 시스템을 구축하였으며, 실제 엔진 연소실의 조건을 모사하기 위해 최대 6 MPa까지 가압할 수 있는 챔버를 사용하였으며, 분무 입경 측정은 5W 수냉식 Ar-ion 레이저, 트랜스미터, 리시버, 신호 처리 장치 등으로 구성된 위상 도플러 입자 분석기를 사용하였다⁽⁶⁻⁷⁾.

2.2 실험 조건 및 방법

분무 특성을 비교하기 위한 테스트 인젝터는 Table 1에 나타낸 바와 같이 노즐 홀 수가 각각 6개, 8개인 서보 솔레노이드 구동 방식 인젝터를 대상으로 실험을 수행하였다. 인젝터 구동 드라이버의 통전 시간은 1 msec로 고정하였으며, 연료의 분사 압력은 80 MPa 및 120 MPa로 변화시켰다.

한편 인젝터 노즐의 홀 수가 엔진 성능 및 배기가스에 미치는 영향을 분석하기 위한 엔진 실험 장치를 Fig. 1과 같이 구성하였다. 엔진 실험 장치는 커먼레일 단기통 디젤 엔진, 연료 공급 및 압력 제어 장치, 연료 분사 제어장치, 연소 및 배기 가스 분석을 위한 계측 장비 등으로 구성하였다.

실험 엔진은 압축비가 17.8, 배기량이 373.3cc인 커먼레일 분사 시스템 단기통 디젤 엔진이며, DC 동력계(55

Table 1 Specifications of test injectors

Test injector	Injector #1 / Injector #2
Type of injector	Solenoid driven
No. of holes	6 / 8

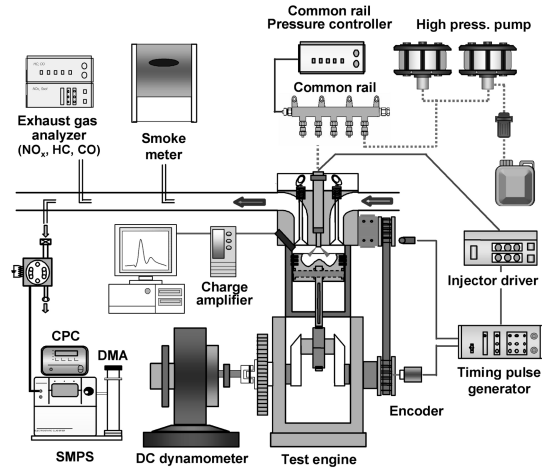


Fig. 1 Experimental apparatus of single cylinder engine

Table 2. Specifications of single cylinder engine

Type	1 cylinder CI engine
Bore(mm)×Stroke(mm)	75×84.5
Displacement volume(cc)	373.3
Compression ratio	17.8
Valve type	DOHC/4 Valve
Fuel injection system	Bosch common rail

kW)에 연결하여 엔진의 회전 속도 및 구동 토크를 제어하였다. 엔진 연료 공급 및 분사 압력은 병렬로 연결된 두 개의 고압 펌프(HSF-300, Haskel)를 이용하여 고압 분사 챔버 내에 연료를 압송하고, 압력 제어 장치를 통하여 커먼레일의 압력을 일정하게 유지할 수 있도록 구성하였다.

한편 연료 분사 시기는 크랭크각 센서(1,800pulse/rev)와 캠축 위치 센서에서 검출된 신호를 타이밍 펄스 발생기(timing pulse generator)를 보내 TDC를 인식한 후 0.1° 단위로 제어 가능하도록 시스템을 구성하였으며, 인젝터 드라이버(TDA 3300, TEMS)와 동기시커 미리 지정된 크랭크 각도에서 연료를 분사하고 인젝터 통전 시간을 조절하여 연료 분사량을 제어할 수 있도록 시스

템을 구축하였다.

연소 압력 데이터는 실린더 헤드에 설치한 피에조 압 전 소자 방식의 압력 센서(6052C, Kistler)와 DAQ보드(PCI-MIO-16E-1, NI)를 이용하여 취득하였으며, 취득된 데이터는 Labview를 이용하여 실시간으로 연소 해석을 할 수 있도록 연소 해석 시스템을 구성하였다. 한편, 인젝터 노즐 홀 수가 배기 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 스모크 미터(AVL)와 배기 가스 분석기(MEXA-554JK, HORIBA)를 배기 파이프 후단에 설치하여 입자상 물질, 질소산화물, 미연 탄화수소 및 일산화탄소 등의 배출량을 측정하였으며 실험에 사용된 엔진의 주요 제원을 Table 2에 나타내었다.

한편, 분무 입경 측정을 위하여 Fig. 3에 나타낸 가시화 결과를 이용하여 분무 중앙의 축 방향인 Z축, 분무 방향 좌측인 L축, 그리고 우측인 R축을 정의하고 인젝터 구동 드라이버의 통전 시간이 1 msec일 때 분무 중심인 노즐 팁으로부터 분무 중심을 따라 50 mm 떨어진 위치를 분무 입경 측정 위치로 정의하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연료 분사율 특성

Fig. 2와 Fig. 3에는 각각 Table 1에 나타낸 6공 인젝터와 8공 인젝터의 분사율을 측정하여 나타내었다. 선도에 나타낸 바와 같이 본 연구에 적용한 인젝터의 경우, 노즐 홀 수가 8개인 인젝터의 분사율이 6개인 인젝터 보다 증가한 것을 알 수 있으며, 노즐 홀 수가 증가함에 따라 분사 종료 시간이 다소 늘어나고 있음을 알 수 있다.

또한 분사 압력이 120 MPa로 증가하면 분사율 피크 값과 분사 종료 시점이 더욱 증가하여 연료 분사량이 증가하고 있음을 확인할 수 있으며, 이때의 실제 분사량

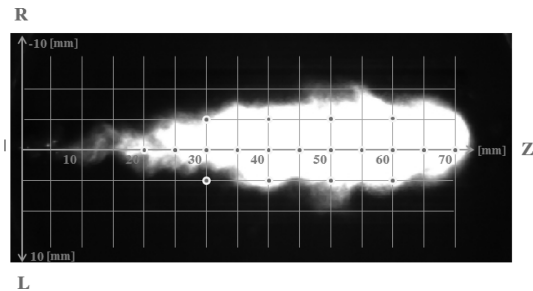


Fig. 2 Measurement point for SMD of spray

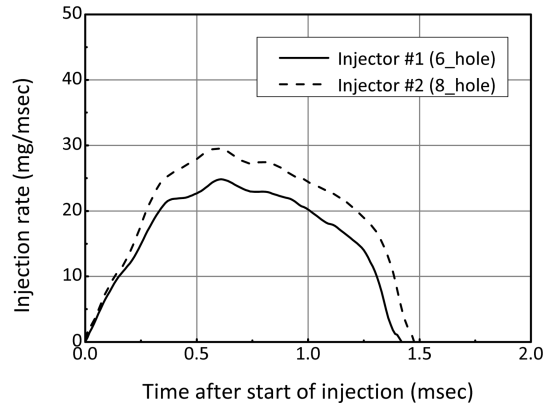


Fig. 3 Injection rate vs. time after start of injection ($P_{inj}=80$ MPa, $T_{inj}=1$ msec)

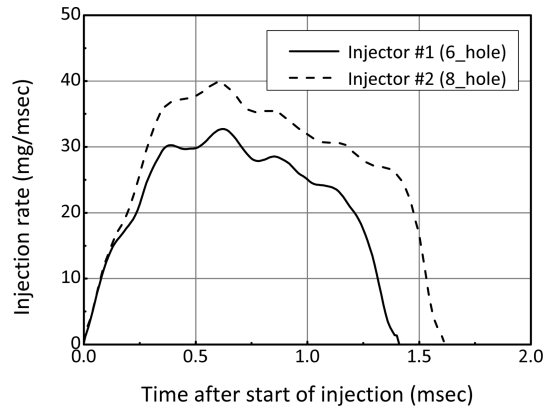


Fig. 4 Injection rate vs. time after start of injection ($P_{inj}=120$ MPa, $T_{inj}=1$ msec)

은 분사 압력이 80 MPa일 경우 24.1 mg에서 30.7 mg으로, 분사 압력이 120 MPa일 경우 53.1 mg에서 56.2 mg으로 증가하였다.

3.2 분무 가시화 특성

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 본 연구에 적용한 6공 및 8공 인젝터의 분무 특성을 가시화하여 분무 도달 거리(spray tip penetration)를 정량화한 선도이다. 가시화 실험 결과 분사 압력에 관계없이 두 인젝터 모두 동일한 시간에 분무 발달이 시작되고 있어 두 인젝터의 응답 성능이 동일함을 확인할 수 있다.

한편, 분무 도달 거리는 6공 인젝터의 경우가 8공 인젝터에 비해 다소 큰 것으로 나타나고 있으며, 이러한 경향은 분사 압력을 120 MPa로 상승시킨 경우에 더욱 뚜렷하게 나타나 8공 인젝터의 경우 노즐 지름이 다소

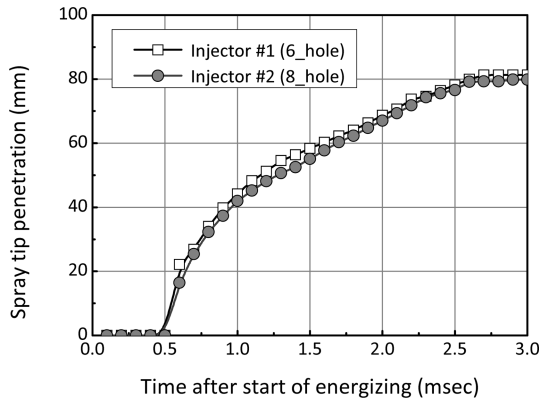


Fig. 5 Spray tip penetration vs. energizing time ($P_{inj}=80$ MPa, $T_{inj}=1$ msec)

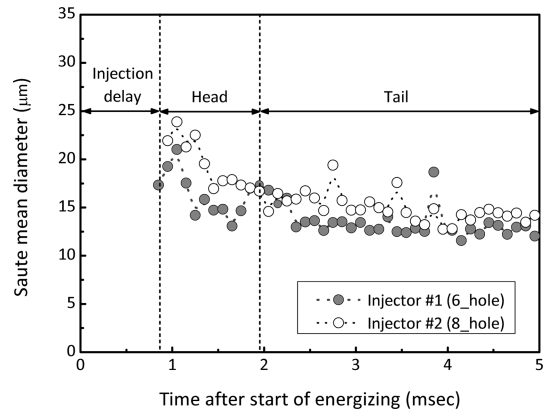


Fig. 7 Comparison of SMD measurements ($P_{inj}=60$ MPa, $T_{inj}=1$ msec)

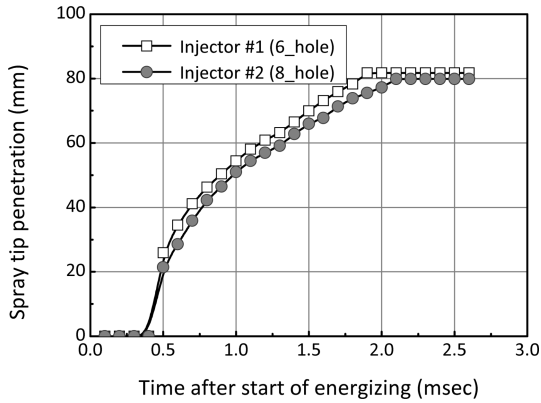


Fig. 6 Spray tip penetration vs. energizing time ($P_{inj}=120$ MPa, $T_{inj}=1$ msec)

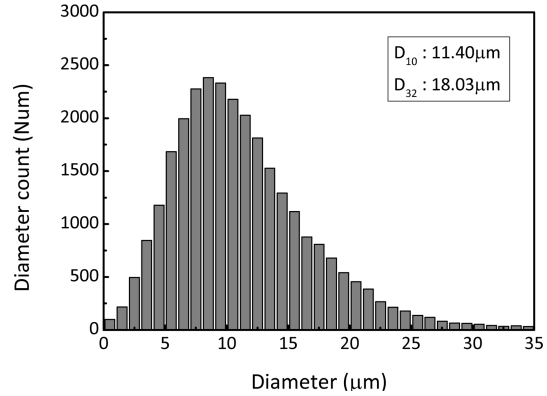


Fig. 8 Drop size histogram of 6_hole injector ($P_{inj}=60$ MPa, $T_{inj}=1$ msec)

작게 가공되어 분무 도달 거리가 감소한 것으로 판단되며, 따라서 인젝터 홀 수의 증가는 상대적으로 협소한 연소실의 적용이 가능할 수 있다는 것을 예측할 수 있다.

3.3 분무 미립화 특성

Fig. 6에는 연료의 분사 압력이 60 MPa, 분위기 압력을 대기압으로 유지한 상태에서 6공 및 8공 인젝터의 미립화 특성을 확인하기 위하여 노즐 팁으로부터 분무 중심을 따라 50 mm 떨어진 위치에서 SMD를 측정하여 나타낸 결과이다. 선도에 나타난 바와 같이 노즐 팁으로부터 50 mm 떨어진 위치에서 분무 선단부(head)의 SMD는 6공 인젝터의 경우 약 16~24 μm 의 범위에 분포하고 있으며, 8공 인젝터의 경우에는 이보다 다소 낮은 수준인 약 13~21 μm 의 범위에 분포하고 있음을 알 수 있다. 그러나 분무 후단부(tail)로 가면 SMD 분포는

이보다 안정되어 6공 인젝터의 경우 약 12~16 μm , 8공 인젝터의 경우에는 좀 더 낮은 수준인 약 11~14 μm 의 범위에 골고루 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

따라서 본 실험에 적용한 8공 인젝터의 노즐의 지름이 다소 작게 가공된 것으로 예측할 수 있으며, Overall SMD는 각각 18.03 μm , 15.32 μm 로 계속되었다. 이러한 Overall SMD 분포도를 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타내었다.

3.4 연소 및 배기 특성

이상의 분무 특성 실험 결과를 바탕으로 6공 인젝터와 8공 인젝터를 단기통 엔진에 장착하였을 경우, 연소 및 배기 특성을 확인하기 위하여 엔진 연소 실험을 수행하였다.

엔진 회전 속도는 1,200 rpm으로 운전하였으며, 동일

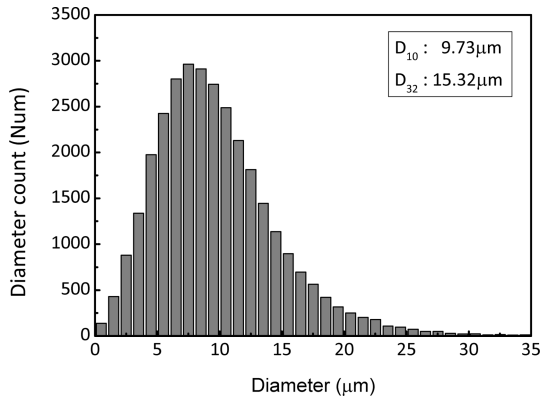


Fig. 9 Drop size histogram of 6_hole injector ($P_{inj}=60$ MPa, $T_{inj}=1$ msec)

한 실험 조건을 유지하기 위하여 연료 분사 압력과 분사량은 각각 120 MPa, 11.5 mg으로 동일하게 운전하였다.

이와 같은 운전 조건에서 연료 분사 시기를 변화시키면서 연소 압력을 측정하여 연소 해석을 수행하였으며, IMEP를 계산하여 Fig. 9에 나타내었다.

실험 결과, 6공 인젝터를 장착하였을 경우가 8공 인젝터를 적용한 경우에 비해 도시 평균 유효 압력(IMEP)가 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 결과는 본 연구에서 실험한 단기통 엔진에 장착되는 기본 인젝터가 6공 인젝터로 엔진의 연소 시스템이 기본 인젝터에 최적화되었기 때문에 IMEP가 높게 나타난 결과이다. 그러나 8공 인젝터를 적용한 경우에도 기본 인젝터를 적용한 경우와 동일한 연소 특성을 보이고 있어 본 실험에 적용한 엔진에 8공 인젝터를 적용하여 배기 특성 실험을 수행하여도 큰 무리가 없다는 것을 보여주고 있다.

동일 운전 조건에서 Soot 발생량을 측정 한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 선도에 나타나 있듯이 6공 인젝터를 장착한 경우에 비해 8공 인젝터를 적용한 경우 Soot의 발생량이 적은 것으로 나타나고 있으며, 이러한 경향은 점화 시기가 진각될수록 더욱 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 이러한 결과는 동일한 연소실 공간에 8공 인젝터를 적용함으로써 연소실 내의 공기와 연료의 혼합율이 높기 때문에 나타나는 현상이다.

따라서 인젝터 노즐 홀 수의 증가는 연소실 내부의 연료와 공기의 혼합을 증가로 입자상 물질의 발생량을 저감시킬 수 있다는 것을 실험적으로 확인할 수 있다.

한편, HC 측정 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 6공 인젝터를 적용한 경우, HC의 발생량이 모든 분사 시기에 8공 인젝터를 적용한 경우 보다 높은 것으로 나타났다.

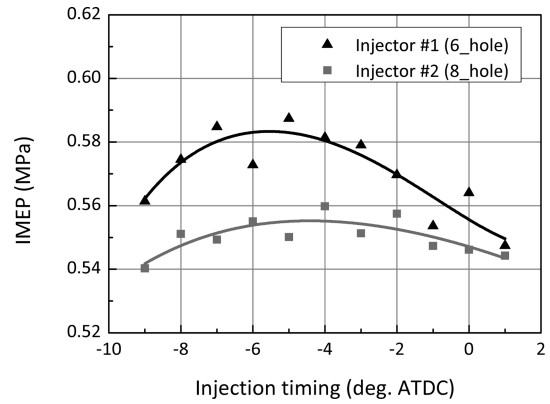


Fig. 10 IMEP characteristics of test injectors ($P_{inj}=120$ MPa, $m_{fuel}=11.5$ mg @1,200 rpm)

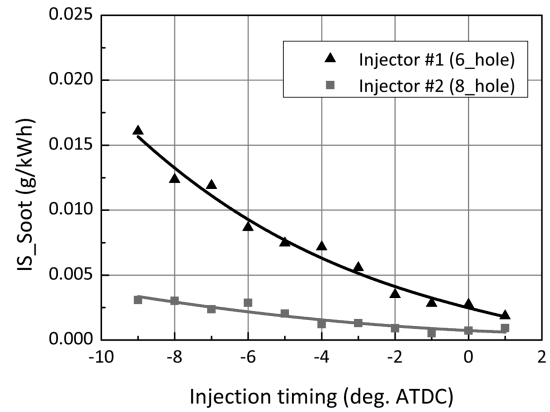


Fig. 11 IS_Soot characteristics of test injectors ($P_{inj}=120$ MPa, $m_{fuel}=11.5$ mg @1,200 rpm)

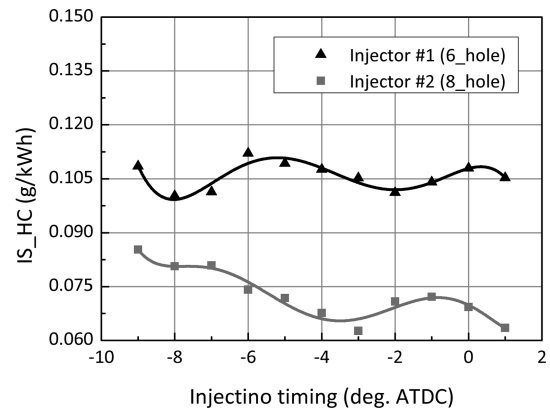


Fig. 12 IS_HC characteristics of test injectors ($P_{inj}=120$ MPa, $m_{fuel}=11.5$ mg @1,200 rpm)

이러한 현상은 6공 인젝터의 경우 동일 분사 압력에서 상대적으로 긴 분무 도달 거리를 가지기 때문에 피스톤

캐버티와의 Wall Impinging 현상이 많이 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 인젝터 노즐 홀 수의 변화에 따른 고압 디젤 인젝터의 클린 디젤 엔진 적용 가능성을 확인하고 연소실 형상 최적화를 위한 데이터를 확보하기 위하여 연료 분무 특성, 엔진 연소 및 배기 특성을 실험적으로 규명하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 본 실험에 적용한 8공 인젝터의 분사율은 6공 인젝터보다 높은 것으로 측정되었으나 노즐 지름의 감소로 동일 분사 압력에서 분무 도달 거리는 감소하였다.

2) 본 실험에 적용한 6공 및 8공 인젝터의 SMD는 분무 선단부에서는 각각 16~24 μm , 13~21 μm , 후단부에서는 각각 12~16 μm , 11~14 μm 의 범위에 분포하였으며, Overall SMD는 각각 18.03 μm , 15.32 μm 로 측정되었다.

3) 6공 인젝터가 기본으로 장착되는 단기통 엔진 실험에서 8공 인젝터의 적용 가능성을 확인하였으며, 실험 결과 8공 인젝터를 적용하였을 경우 연소실 내의 높은 혼합율로 soot 발생량이 저감되었으며, 상대적으로 짧은 분무 도달 거리는 HC 발생량이 저감되는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 Euro-VI 2리터급 클린디젤자동차용 인젝터 국산화 기술개발사업의 지원을 받아 수행한 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Y. Lee, J. Jang, S. Lee and S. Oh, "Comparisons of Low Temperature Combustion Characteristics between Diesel and Biodiesel According to EGR control", Journal of ILASS-Korea, Vol. 16, No. 3, 2011, pp.119-125.
- (2) J. W. Lee, S. Lee, J. S. Jang, "Numerical Investigation on Capture of Sub-Micron particles in Electrostatic Precipitator without Corona Discharger", Journal of ILASS-Korea, Vol. 16, No. 2, 2011, pp. 69-75.
- (3) S. Im, T. Kim., S. Yu, "An Experimental Study on Injection and Durability Characteristics of Common-rail Injector According to mixture Ratio of Bio-diesel", Journal of ILASS-Korea, Vol. 16, No. 1, 2011, pp. 44-55.
- (4) I. Jo, J. Kim, J. Lee, "Analysis of Dynamic Characteristics in Two-stage Injection for CRDi Injectors Based on AMESim Environment", Journal of ILASS-Korea, Vol. 17, No. 2, 2012, pp. 57-63.
- (5) M. S. Chon, Y. H. Hwang, H. K. Suh and C. S. Lee, "Atomization and Evaporation Characteristics of DME Fuel for the Application of HCCI Diesel Engines", Journal of ILASS-Korea, Vol. 11, No. 3, 2006, pp. 140~146.
- (6) S. Park, H. J. Kim, C. S. Lee, "A Study on the Spray, Combustion, and Exhaust Emission Characteristics of Dimethyl-ether (DME) by Experiment and Numerical Analysis", Journal of ILASS-Korea, Vol. 15, No. 1, 2010, pp.31-37.
- (7) S. H. Bang, M. S. Chon, C. S. Lee, "An Experimental Investigation on Spray Behavior of Biodiesel and DME on Blended Ratio in High Temperature and Pressure Ambient Conditions", Journal of ILASS-Korea, Vol. 15, No. 1, 2010, pp.17-24.