클린 디젤엔진 적용을 위한 솔레노이드 및 피에조 인젝터의 분무특성

전 문 수[†]

Spray Characteristics of Solenoid-driven and Piezo-driven Type Injectors for the Clean Diesel Engine Application

Mun Soo Chon[†]

Key Words: Spray characteristics(분무 특성), Injection condition(분사 조건), Piezo-driven type injector(피에조 인젝터), Clean diesel engine(클린디젤엔진)

Abstract

This paper presents spray characteristics of piezo-driven type common-rail injector and comparisons to those of solenoid-driven type. Experiments were conducted to measure spray penetraion and SMD distributions using a spray visualization system and PDPA (phase Doppler particle analyzer) system. Injection conditions including injection pressure and energizing durations were varied in order to analyzing effects of injection conditions on spray characteristics. Furthermore, ambient pressures were increased for keeping ambient gas density close to in-cylinder pressure of diesel engine. Results showed that injection delay of piezo-driven type injector was much shorter than those of solenoid driven type and exhibited enhanced atomization performances.

1. 서 론

최근 화석 연료 사용 및 수송용 차량의 급증으로 지구 온난화 문제는 더욱 심각해지고 있다. 따라서 자동차로부터 배출되는 이산화탄소의 발생을 억제하기 위한 고연비 차량에 대한 관심은 Euro-6와 같은 범 국가적 규제 차원을 떠나 소비자에게는 실생활 문제로 인식되고 있어 이를 만족시키기 위한 기술적 노력이 절실히 요구되고 있는 상황이다. 이러한 노력의 일환으로 열효율 측면에서 상대적으로 유리한 디젤 자동차의 보급이 유럽을 중심으로 전 세계적으로 꾸준히 증가하고 있으며, 국내의 경우에도 커먼레일 방식의 연료 공급 시스템을 장착한 승용 디젤 자동차의 보급이 점차로 증가하고 있는

추세이다^(1,2).

승용 디젤 엔진은 기존 디젤 엔진의 연료 분사 압력을 약 1,350 bar로 상승시킬 수 있는 고압 분사 시스템과 이를 정밀하게 제어할 수 있는 커먼레일 시스템 및 솔레노이드 구동 방식의 인젝터가 개발되면서부터 본격적으로 대중적 보급이 이루어지기 시작되었으며, 최근에는 약 2,000 bar 이상의 분사 압력에서 연료 분사의 정밀 제어가 가능한 서보 솔레노이드 방식 인젝터와 인젝터 밸브 개폐 시간의 정밀 제어가 가능하고 응답 속도가 매우 우수한 피에조 타입 인젝터 등이 개발되어 Euro-6 및 Post Euro-6와 같은 보다 엄격한 연비 및 배기 규제를 만족시킬 수 있는 클린 디젤 자동차의 핵심 연소 기술을 개발할 수 있는 기술적 토대가 어느 정도 이루어진 상태이다^(3,4).

2,000 bar 이상의 고압 연료 분사 시스템 적용은 다량의 연료 분사 및 미립화의 촉진으로 인한 고효율 연소로 연비 향상 및 유해 배기 가스 생성 억제가 가능하여 Euro-6 및 Post Euro-6 배기 규제에 능동적으로 대응하

(2012년 9월 18일 접수 ~ 2012년 9월 21일 심사완료, 2012년 9월 24일 게재확정)

[†]한국교통대학교 에너지시스템공학과

E-mail : mschon@ut.ac.kr

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

기 위한 필수적인 핵심 연소 기술이다.

따라서 본 연구에서는 전술한 서보 솔레노이드 및 피에조 방식의 고압 디젤 인젝터의 클린 디젤 엔진 적용 가능성을 확인하고 연소실 형상 최적화를 위한 데이터를 확보하기 위하여 연료 분사 압력, 분위기 압력, 분사 기간 등 다양한 분사 조건 변화에 따른 연료 분사율, 분무 도달 거리 및 분무 평균 입경 등을 실험적으로 규명하였다.

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 압력 센서 및 등을 사용하여 연료 분사율 데이터를 취득하였다.

한편, Fig. 1과 Fig. 2에는 각각 고압 인젝터의 분사 조건 변화에 따른 분무 가시화 및 분무 발달 과정을 촬영하기 위한 가시화 시스템과 분사된 연료 액적의 입경을 측정하기 위한 분무 입경 측정 시스템의 개략도를 나타내었다. 분무 발달 과정을 정량화하기 위한 가시화 시스템은 커먼레일 방식의 고압 연료 공급 장치, Nd:YAG 레이저를 광원으로 하는 고속 카메라, 분무 영

Fig. 1 Schematics of a spray visualization system

Fig. 2 Schematics of a PDPA system

상 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 체임버를 사용하였다⁽⁶⁾.

분무 입경 측정은 5W 수냉식 Ar-ion 레이저, 트랜스미터, 리시버, 신호 처리 장치 등으로 구성된 위상 도플러 입자 분석기를 사용하였다⁽⁷⁾.

2.2 실험 조건 및 방법

분무 특성을 비교하기 위한 테스트 인젝터는 서보 솔레노이드 구동 방식 인젝터 2개, 피에조 구동 방식 인젝터 1개 등 총 3개 인젝터를 대상으로 실험을 수행하였다. 먼저 분사 및 가시화 결과를 비교하기 위한 실험 조건으로 3 MPa의 분위기 압력과 40 MPa, 80 MPa, 120 MPa의 분사 압력 조건에서 연료 분사를 위한 인젝터 통전 시간을 각각 0.6 msec, 0.9 msec, 1.2 msec로 변화시키면서 연료 분사량 및 분사율을 측정하였으며, 실험 인젝터의 종류, 분사율 및 분무 특성 실험 조건을 Table 1, Table 2에 각각 정리하여 나타내었다.

한편, 분무 입경 측정을 위하여 Fig. 3에 나타난 가시화 결과를 이용하여 분무 중앙의 축 방향인 Z축, 분무 방향 좌측인 L축, 그리고 우측인 R축을 정의하고 노즐

Table 1 Specifications of test injectors

Test injector	P1/S1/S2
Type of injector	Piezo/Solenoid/Solenoid
No. of holes	8/7/8

Table 2 Test conditions for injection rate

Injection pressure [MPa]	40, 80, 100*, 120
Ambient pressure [MPa]	0.1*, 1, 2, 3**
Energizing duration [msec]	0.6*, 0.9, 1.2
Induced voltage*** [V]	180

*PDPA measurements only

**Injection rate measurements only

***Piezo type injector only

Fig. 3 Measurement point for SMD of spray

팁으로부터 분무 중심을 따라 5 mm 떨어진 위치를 분무 입경 측정 위치로 정의하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연료 분사율 특성

Fig. 4는 각각 Table 1에 나타난 인젝터에 대해 연료의 분사 압력 및 인젝터 통전 시간 변화에 따른 분사량 및 분사율을 나타낸 선도이다. 분사 압력이 증가할수록 연료 분사량이 선형적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있으며, 각 인젝터들의 연료 분사량은 대체적으로 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 선도에서 S1 인젝터의 연료 분사량이 다소 낮게 나타나는 원인은 Table 1에 나타난 바와 같이 S1 인젝터의 홀 개수가 7개로 다른 인젝터 보다 작기 때문이다.

한편, 3 MPa의 분위기 압력에서 120 MPa의 분사압력으로 연료를 분사하였을 때 세 가지 인젝터의 분사율 특성을 나타낸 Fig. 5를 살펴보면, Piezo 구동 방식 인젝터는 통전 시작 후 약 0.22 msec를 지나면서 실제 연료의 분사가 이루어지나, Solenoid 구동 인젝터는 이보다 조금 늦은 통전 후 약 0.34 ms에 연료 분사가 이루어져 본 연구에 적용한 인젝터의 경우 분사 시작에 대한 응답성은 Piezo 구동 인젝터가 Solenoid 구동 인젝터에 비

Fig. 4 Effects of injection pressure on injection quantity

Fig. 5 Effects of injection pressure on injection rate
($P_{inj}=120$ MPa, $P_{amb}=3$ MPa)

해 약 0.12 msec 더 빠르다는 것을 알 수 있으며, Solenoid 구동 인젝터의 분사 종료 응답성은 분사 기간이 길어질수록 느려지고 있음을 확인할 수 있다.

3.2 분무 가시화 특성

Fig. 6에는 80 MPa의 분사 압력 및 2 MPa의 분위기 압력에서 1.2 ms의 통전 시간으로 연료를 분사한 경우 세 가지 인젝터의 에서 분사된 분무 특성을 가시화하여 나타낸 결과이다.

S2 인젝터의 경우, 통전 시간 후 0.5 ms에서 분무 발달이 다른 두 인젝터와 비해 다소 느리게 성장되는 결과를 보이고 있다. 이러한 현상을 정량적으로 파악하기 위하여 분사 압력 및 분위기 압력 변화에 따른 가시화 결과를 분무 도달 거리로 정량화하여 Fig. 7에 나타내었다. 선도에서 알 수 있듯이 동일 분사 압력에서 분사 초기 구간에서 분무 도달 거리 곡선의 기울기 변화는 거

Fig. 6 Comparison of spray visualization results

(a) $P_{inj} = 80\text{MPa}$, $P_{amb} = 2\text{MPa}$ (b) $P_{inj} = 120\text{MPa}$, $P_{amb} = 2\text{MPa}$

Fig. 7 Effects of injection pressure on spray tip penetration

의 없었으며 통전시간이 증가함에 따라 분무 도달 거리가 증가하고, 분위기 압력이 증가함에 따라 분무 도달 거리는 감소하는 것으로 나타났다.

(a) Piezo type injector (P1)

(b) Solenoid type injector (S1)

Fig. 8 Comparison of SMD measurements

3.3 분무 미립화 특성

Fig. 8은 100 MPa의 분사 압력에서 P1 인젝터와 S1 인젝터의 SMD 데이터를 측정하여 나타낸 결과이다.

Fig. 8의 (a)에 나타난 P1 인젝터의 경우, 분사 시작 후 약 1.0~1.5 msec에서 SMD가 급격하게 감소하고 있으며 S1 인젝터는 분사가 시작된 후 1.2~2.0 ms 범위에서 SMD의 급격한 감소 나타나고 있다. 이러한 결과는 피에조 구동 방식 인젝터의 응답 성능이 솔레노이드 구동 방식 인젝터에 보다 우수하기 때문에 상대적으로 빠른 시간에 분사된 연료가 먼저 미립화되어 나타나는 현상으로 Fig. 5에 나타난 분사율 특성 결과와 일치하는 경향을 보이고 있다.

3.4 고압 분무 특성

Fig. 9는 200 MPa의 고압 분사 조건에서 서보 솔레노이드 구동 방식 인젝터의 분사율 특성 파악하기 위해

Fig. 9 Effects of injection pressure on injection rate ($P_{inj}=50, 100, 200$ MPa, $P_{amb}=3$ MPa)

Fig. 10 SMD measurements at 200 MPa injection pressure

측정한 결과를 50 MPa 및 100 MPa 분사 압력 경우와 비교하여 나타낸 선도이다. 본 연구에 적용된 서보 솔레노이드 구동 방식 인젝터는 분사 압력이 증가할수록 분사율 peak 값이 증가하고 있음을 알 수 있으며, 분사 시작에 대한 응답성은 분사 압력과 무관하게 동일한 것으로 나타나나 분사 종료 응답성은 분사 압력이 증가할수록 느려지고 있음을 확인할 수 있다.

한편, 200 MPa의 고압 분사 조건에서 서보 솔레노이드 인젝터의 분사 시간 경과에 따른 SMD 측정 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 분사 압력을 200 MPa로 증가시킨 경우에는 100 MPa의 분사 조건에 비해 미립화가 좀 더 촉진되어 Fig. 8에 나타낸 SMD 측정 결과 보다 낮은 수준인 15~10 μm 범위에 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 클린 디젤 엔진 적용 가능성을 평가하고 연소실 형상 최적화를 위하여 다양한 분사 조건에서 서보 솔레노이드 및 피에조 방식의 고압 디젤 인젝터 분무 특성을 실험적으로 규명하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 분사율 측정 결과, 본 연구에 적용한 인젝터의 경우 분사 시작점에서 Piezo 구동 인젝터가 Solenoid 구동 인젝터에 좀 더 빠른 응답성을 갖는다는 것을 확인하였으며, Solenoid 구동 인젝터의 분사 종료 응답성은 분사 기간이 길어질수록 느려지고 경향을 나타내었다.

2) Piezo 및 Solenoid 구동 방식과는 무관하게 동일 분사 압력에서 분사 초기 구간에서 분무 도달 거리 곡선의 기울기 변화는 미미하였으며, 통전 시간이 증가함에 따라 분무 도달 거리는 증가하고, 분위기 압력이 증가할수록 분무 도달 거리는 감소하였다.

3) 분무 미립화 특성 실험 결과, Piezo 구동 방식 인젝터의 응답 성능이 Solenoid 구동 방식 인젝터에 보다 우수하여 분사된 연료가 상대적으로 빠른 시간에 미립화되었으며, 이러한 결과는 분사율 특성 결과와 일치하였다.

4) 서보 Solenoid 인젝터의 분사 압력을 200 MPa로 증가시킨 경우, 100 MPa의 분사 조건에 비해 분사량은 증가하였으며, 미립화가 촉진되어 SMD는 보다 낮은 수준인 15~10 μm 범위에 분포하였다.

후 기

이 논문은 2012년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

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 and 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 and 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 and 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 and 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.
- (9) S. H. Bang, M. S. Chon and 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.