

디젤엔진의 연료분사계가 연소특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

윤 천 한*, 김 경 훈**

An Experimental Study on the Combustion Characteristics with Fuel Injection System in the Diesel Engine

C-H Yoon, K-H Kim

Key words : Diesel engine(디젤엔진), Engine performance(엔진성능), Fuel injection system(연료분사계), Emission(배기 배출물), DPF(디젤후처리장치), EGR(배기가스재순환), NOx(질소산화물), Smoke(매연)

Abstract

The characteristics of engine performance with fuel injection system in D.I. diesel engine were studied in this paper. A fuel injection system has an important role in the performance and emission gas in a diesel engine. In this paper, an experimental study has been performed to verify the effect of the performance and the emission gas with the factors such as diameters of an injection nozzle hole, diameters of an injection pipe and injection timing in the fuel injection system.

The authors have obtained the results that optimizing the factors of fuel injection system is significant to enhance the performance of the engine system and consumption ratio of fuel, smoke, and NOx.

1. 서 론

디젤엔진의 열효율은 가솔린엔진보다 높기 때문에 연료의 경제성이 중요시되는 차량이나 선박 등의 교통수단 뿐만 아니라 산업용으로도 폭 넓게 이용되고 있다. 하지만 매연(Smoke)이나 NOx 등의 유해배출가스의 배출 측면에서는 대단히 불리

하기 때문에 대기 오염의 개선과 에너지 저감을 위해서는 연소실 개선¹⁾²⁾, 적정 선회비³⁾, 터보과급⁴⁾, 연료분사장치의 개발⁵⁾, NOx 촉매, DPF 등의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 아직도 많은 연구를 필요로 하고 있다. 연료분사시스템은 디젤엔진 성능 향상과 배출가스 저감에 직접적으로 작용하므로 대단히 중요한 인자로서 연료분사계의 여러

*경희대학교 대학원 기계공학과
**경희대학교 기계·산업시스템공학부

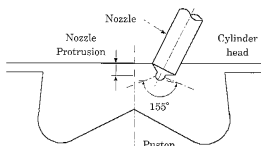


Fig. 1 Nozzle protrusion & Injection angle

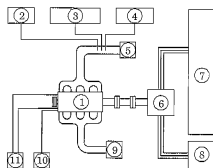
인자를 변수로 하여 많은 연구들이 수행되고 있는 실정이다. 또한 분사압력, 분사율, 분사시간, 분사시기 등의 연료분사시스템의 변수를 자유롭게 변화시켜 엔진의 운전조건에 가장 적합한 시스템으로 만들려는 전자화의 연구도 진행되고 있다¹⁰⁾.

디젤엔진에서의 NOx의 생성을 억제하기 위해서는 연소공간의 화염온도 저하나 고온상태의 지속시간을 단축하는 것이 효과적이다. 연소와 관련하여 직접적으로 NOx의 배출 수준과 관계가 있는 인자로서는 연소실의 형상, 연료분사계, 흡기와 배기계, 운전조건, 연료 등이 있으며, 특히 연소실의 형상과 연료분사계의 각 요소의 적당한 조합으로 NOx를 저감할 수가 있다¹¹⁾¹²⁾. 디젤엔진의 혼합기 형성과정은 연소실 내의 연료분사의 시간적·공간적으로 복잡한 과정을 거치면서 분무의 미립화 및 증발과정을 통하여 연소실 내의 공기와 혼합하고 확대 연소함으로써 연소 상태에 큰영향을 미치는 것이다. 이러한 분무에 관한 연구¹³⁾는 종래부터 많은 연구가 진행되어 왔으나, 분사계 전반에 걸쳐 성능과 유해 배출가스에 미치는 영향을 체계적으로 조사된 연구는 그다지 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 위에서 언급한 인자들 중에서 엔진 성능과 유해배출가스의 저감을 위해 가장 효과적인 연료분사계 중에서 노즐의 분공지름, 분사판의 지름, 분사시기 등의 변경에 따른 영향을 고찰하고자 한다.

2. 연료분사시스템의 개요

연료분사시스템은 디젤엔진의 심장부라고 할 수 있는 중요한 기구로서 운전자의 조작에 따라 최적



- | | |
|-------------------------|----------------------------|
| 1. Diesel Engine | 2. PM Analyzer |
| 3. Smoke Meter | 4. Gas Analyzer |
| 5. Exhaust Surge Tank | 6. Dynamometer |
| 7. Controller | 8. Data Acquisition System |
| 9. Inlet Air Surge Tank | 10. Fuel Tank |
| 11. Cooling System | |

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

의 시기에 고압의 연료를 만들어 자극히 정확한 분사량으로 엔진의 연소실에 무화상태로 분사시키고, 또한 엔진의 부하에 대하여 미세한 분사량 조절이 가능한 기구로 되어 있다¹⁴⁾.

그림 1은 직접분사식 디젤엔진에 장착되어 있는 용형 노즐(Hole type nozzle)의 분사각도를 나타낸 것이다.

디젤엔진에서 연료분사시스템은 기관성능을 좌우하는 매우 중요한 인자이며, 특히 분사량, 분사시기, 분사시간, 분사율, 노즐의 분공 지름, 분사판의 지름 및 식이 등은 엔진과의 초기 매칭(Matching) 시 주요 인자로서 취급하고 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험 장치

실험장치는 그림 2와 같이 디젤엔진의 성능 및 배출가스를 측정할 수 있도록 구성하였고, 엔진은 보어(Bore) 123.0mm, 스트로크(Stroke) 155.0mm, 6기통 11 l, 압축비 17.1:1인 리엔트란트형(Re-entrant type) 연소실을 갖는 직접분사식 디젤엔진으로서 그 주요 제원은 표 1에 나타났다.

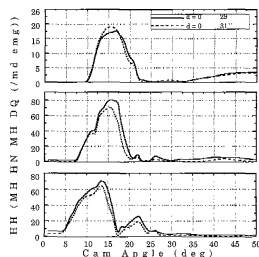
최대출력 330kW, 최대토크 1960Nm, 최대회전

Table 1 Specifications of test engine

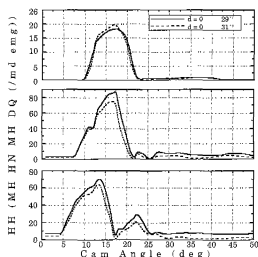
Items	Specification
Engine type	L6
Injection	Direct Injection
Bore × Stroke	123.0 mm × 155.0 mm
Displacement	11,050 cc
Compression ratio	17.1:1
Used fuel	Diesel fuel
Combustion chamber	Reentrant

Table 2 Specifications of test pump

Items	Specification
Type	S3000
Cam lift	11mm
Plunger diameter	φ12mm
Plunger lead	D22+45mm
Mean injection rate	38mm ³ /deg.
Pre-stroke	4.7mm
Opening pressure	1.88MPa

Fig. 3 The characteristics of injection in 150 mm³/st

수 3000rpm인 다이내모미터(Dynamometer)로 측정하였다. 연료분사시스템은 연료분사압력의 고압화를 위해 Bosch식 S3000형 분사펌프로서 플런저의 지름은 φ12mm이고, 프리스트로크(Prestroke)는 4.7mm로 조정하여 평균 분사율은 38mm³/st가 되도록 조정하였으며, 분사량, 분사율 등은 15kW의 테스터벤치(Tester bench)에서 실시하고, 연료분사시스템의 주요 제원은 표 2에 나

Fig. 4 The characteristics of injection in 160 mm³/st

타냈다. 또한 노즐은 홀형(Hole type) 다공 노즐을 사용하였다.

3.2 실험 방법

엔진의 성능과 배출가스의 특성을 파악하기 위해 분사관은 지름이 φ2.0mm, φ2.2mm이고, 길이가 650mm인 것을 사용하였으며, 분사노즐은 φ 0.29 × 5, φ0.31 × 5이고 분사각이 15°인 홀형(Hole type) 다공 노즐을 사용하였다.

실험은 저속(1000rpm), 중속(최대토크점; 1400rpm), 고속(최대출력점; 2200rpm)에서 측정하였으며, 연료분사장치는 6기통 PE-P형 열형(In-line type) 펌프로서 지름이 φ12mm인 우면 양리드(Double lead)의 플런저(Plunger)를 사용하였다. 연료분사시스템의 분사량, 분사율(DQ), 펌프측 압력(PP), 노즐측 압력(PN)의 측정을 위해 15kW의 테스터벤치(Tester bench)에 장착하여 구동시켰으며, 펌프 회전수는 구동축에 설치된 타코미터(Tachometer)를 이용하여 측정하였다.

컨트롤랙(Control rack)의 위치는 1/100mm까지 측정할 수 있는 다이얼게이지를 사용하였으며, 분사특성은 펌프회전수 1155rpm에서 분사관 φ 2.2mm, 길이가 650mm, 개별압 21.6MPa로 조정하여 실시하였고, 여기에서는 주로 150mm³/st인 경우를 실험하였다.

4. 실험결과 및 고찰

그림 3과 4는 연소특성과 분사특성의 상관관계를 파악하기 위해 $\phi 0.29 \times 5$, $\phi 0.31 \times 5$ 인 노즐로 분사량이 $150\text{mm}^3/\text{st}$, $160\text{mm}^3/\text{st}$ 일 때의 분사율(DQ), 펄스폭 압력(PP), 노즐측 압력(PN) 상태를 나타낸 것으로 $\phi 0.31 \times 5$ 보다 $\phi 0.29 \times 5$ 쪽의 초기 분사압이 약간 증가하고 분사시기가 전각되는 결과를 보이고 있다. 또 본 실험에 사용된 엔진 및 연료분사시스템의 압력전달은 그림 5에 나타낸다.

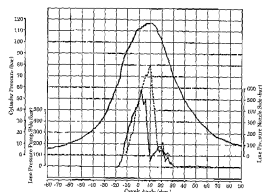


Fig. 5 The diagram of combustion and injection pressure in 2200rpm

4.1 노즐 분공 지름의 효과

그림 3과 4와 같이 동일한 캠과 $\phi 12\text{mm}$ 홀인저울 적용하고 동일한 분사량($150\text{mm}^3/\text{st}$)하에서 노즐의 분공 지름 $\phi 0.29 \times 5$ 와 $\phi 0.31 \times 5$ 인 노즐로 전부하 실험을 한 결과 그림 6과 같이 분공 지름이 작은 $\phi 0.29 \times 5$ 의 경우 분사압이 상승함에 따라 초기 분사율이 감소하고 미립화가 촉진되어 연비와 스모크의 배출량은 줄일 수 있으나, NO_x 는 악화되었고 분사관의 지름이 큰($\phi 2.2\text{mm}$) 것을 적용함에 따라 분사시기에 영향을 미쳐 토크 역시 약간 감소하는 결과를 보이고 있으나, 연비와 스모크를 고려하면 토크의 저감은 과할 수 없다.

4.2 분사관 지름의 효과

동일한 분사노즐을 사용하고 분사관의 지름을 변화시켰을 때의 특성을 그림 7에 나타냈다.

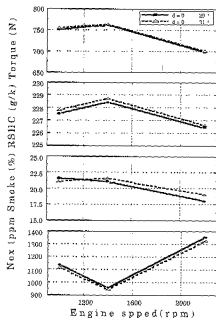


Fig. 6 Effects of nozzle hole diameter

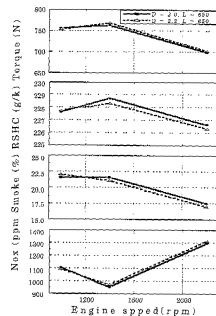


Fig. 7 Effects of injection pipe diameter

중·고속 영역에서의 연비와 토크는 $\phi 2.2\text{mm}$ 쪽이, 저속 영역에서의 스모크는 $\phi 2.0\text{mm}$ 쪽이 우수하였다. 분사관의 지름이 상대적으로 큰 $\phi 2.2\text{mm}$ 로 확대시키면 분사관 내의 마찰저항을 감소시키

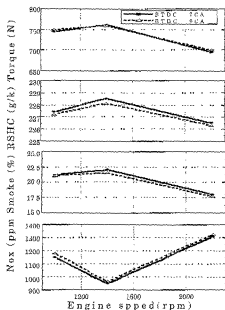


Fig. 8 Effects of injection timing

는 효과 때문에 중·고속 영역에서 분사압의 증대 및 분사시간의 단축효과가 있으며, 분사판 내의 응력이 증대하여 잔압이 증가되어 분사시기가 진각된다. 따라서 연비 및 스모크의 농도를 저감하는 효과를 가져오게 되지만, 토크와 NOx는 증가한다. 반면에 저속영역에서는 분사판 지름의 증대로 인한 송유속도 저하로 나타나 분무 일정을 증대시키는 결과를 가져와 토크와 매연농도를 약화시킬 수 있으며, 중·고속영역에서 $\phi 2.2\text{mm}$ 쪽의 분사시기의 진각으로 인해 실린더 내의 최고 압력이 높아져서 NOx의 배출량이 많아졌다.

4.3 분사시기의 효과

그림 8은 $\phi 0.29 \times 5$ 인 노즐을 사용하여 분사량이 150mm³/st인 상태에서 측정된 결과이다. 분사시기를 진각하여 풀런저의 상승속도가 큰 영역에서 분사시킬 경우 분사압은 증가하고 분사시간을 감소시켜 토크, 연비, 스모크는 개선시킬 수 있으나, 초기 분사량이 증가됨에 따라 NOx의 배출량이 증가되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 노즐의 분공 지름인 $\phi 0.29 \times 5$ 로 감소시켜 분사압을 높인 경우 초기 분사압이 감소하고 분사압이 상승함에 따라 연비와 스모크의 배출량은 줄일 수 있으나, 분공 지름의 감소로 인한 분사시간의 증가로 NOx는 악화되었다.

(2) 분사판이 큰 것($\phi 2.2\text{mm}$)을 적용했을 때 저속에서는 토크, 연비, 스모크는 개선되었으나, 중·고속영역에서 $\phi 2.2\text{mm}$ 쪽의 분사시기의 진각으로 인해 실린더 내의 최고 압력이 높아져서 NOx의 배출량이 많아졌다.

(3) 분사시기를 진각시켜 풀런저의 상승속도가 큰 영역에서 분사시킬 경우 분사압은 증가하고 분사시간을 감소시켜 토크, 연비, 스모크는 향상시킬 수 있으나, 초기 분사량이 증가되고 이에 따라 NOx의 배출량이 증가되었다.

(4) 전체적인 결과에서 초기 분사율을 줄이고 분사시간을 감소시켜야 할 것으로 사료되며, 이를 위해서는 분사노즐의 분공 지름을 줄이고 분사압력을 증가시키고 동시에 변형 밸브, 피어롯트 분사, 가변 타이머 등의 적용이나 각 인자의 적절한 조합이 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] M. Ikegami, M. Fukuda, Y. Yoshihara and J. Kaneko, "Combustion Chamber Shape and Pressurized Injection in High Speed Direct Injection Diesel Engine", SAE 900440, 1990.
- [2] A. Coghe, G. Brunello and E. Tassi, "Effects of Intake Ports on the In-Cylinder Air Motion under Steady Conditions", SAE 880384, 1988.
- [3] S. Shundoh, T. Kakegawa, K. Tsujimura and S. Kobayashi, "The Effects of Injection Parameters and Swirl on Diesel Combustion with High Pressure Fuel Injection", SAE 910489, 1991.
- [4] 채세우, 김성찬, 박종현, "터보과급 디젤기관의 성능에 관한 실험적 연구", 한국자동차공학회논문집, 제2권, 제8호, pp. 76~85, 1994.
- [5] S. Watanabe, T. Takahashi and H. Sami, "A

Study on Effects of High Pressure Injection for DI Diesel Combustion", JSAE, Vol. 44, No. 8, pp. 79~88, 1990.

- [6] M. Shimoda, K. Funai, K. Shimokawa, T. Otani and Joko, "Application of Heavy Duty Diesel Engine to Future Emission Standards", SAE 910482, 1991.
- [7] D. J. Timoney, "Smoke and Fuel Consumption Measurements in a Direct Injection Diesel Engine with Variable Swirl", SAE 851542, 1985.
- [8] D. J. Timoney, "A Simple Technique for Predicting Optimum Fuel-Air Mixing Conditions in a Directed Injection Diesel Engine with Swirl", SAE 851543, 1985.
- [9] A. D. Gosman, Y. Y. Tsui and A. P. Watkins, "Calculation of Three Dimensional Air Motion in Model Engine". SAE, 840229, 1984.
- [10] 윤철환, "직분식 디젤기관의 연료분사계가 기관성능과 배출가스에 미치는 영향", 아주대학교 석사학위논문, pp. 6~11, 1993.

저자 소개



윤철환(尹千漢)

1958년 8월생. 1981년 조선대학교 졸업
1993년 아주대학교 대학원 졸업(석사)
1986년~1999년 (주)두원정공 기술연구소
책임연구원. 1999년~2000년 동아공업
(주) 기술연구소 연구소장. 현재 경희대
교 대학원 기계공학과 박사과정



김경운(金景勳)

1954년 9월생. 1976년 한양대학교 졸
업. 1979년 홍익대학교 대학원 졸업(석
사). 1985년 홍익대학교 대학원 졸업(박
사). 1981년~ 현재 경희대학교 기계산업
시스템공학부 정교수.