커먼 레일 시스템 고압 연료 분사용 스월 노즐 인젝터의 분사 특성에 관한 연구

신 윤 섭¹⁾ · 이 기 수¹⁾ · 김 현 철¹⁾ · 곽 상 신²⁾ · 신 석 신³⁾ · 서 현 규^{*4)}

자동차부품연구원 동력시스템연구센터¹⁾ · (주)신한테크연구소²⁾ · 충남대학교 기계공학과³⁾ · 공주대학교 기계자동차공학부⁴⁾

A Study on the Injection Characteristics of Swirl Nozzle Injector in Common-rail System for High Pressure Fuel Injection

Yunsub Sin¹⁾ · Geesoo Lee¹⁾ · Hyunchul Kim¹⁾ · Sangshin Kwak²⁾ · Suk Shin Shin³⁾ · Hyun Kyu Suh^{*4)}

¹⁾Powertrain System R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjung-ri, Pungse-myun, Chonan-si, Chungnam 330-912, Korea

²⁾R&D Center, Sinhantech Co. Limited, Pilot Plant 2nd No.214, Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan-si, Chungnam 331-822, Korea

³⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

⁴⁾Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan-si, Chungnam 331-717, Korea
(Received 6 August 2012 / Revised 17 September 2012 / Accepted 14 November 2012)

Abstract : In this work, the evaluation of swirl nozzle injector performance was conducted by investigating effective area (A_{eff}), injection mass (m_{inj}), injection rate (Q_{inj}), and injection delay (t_{delay}) under various test conditions. To achieve these, fuel injection analysis system which was composed of fuel supply system, injection system, and control system was installed. At the same time, the swirl nozzle that had 12 orifice hole with 120° injection angle was used in this work. It was revealed that the difference of injection mass (m_{inj}) between base and swirl nozzle injector increased as the injection pressure (P_{inj}) and energizing duration (t_{eng}) decreased under the same test conditions. The maximum injection rate (Q_{inj}) of swirl nozzle injector was higher than base nozzle injector about 2~5%. The injection performance of swirl nozzle was better than base nozzle at low injection pressure (P_{inj}) and short energizing duration (t_{eng}) conditions.

Key words : Bosch's method(장관법), Common rail direct injection(커먼레일 직접 분사), Fuel injection analysis system(연료 분사 분석 장치), Injection rate characteristics(분사율 특성), Swirl type nozzle(스월 타입 노즐)

Nomenclature

A : area, mm²
m : injection mass, mg/st
P : injection pressure, MPa
Q : injection rate, mm³/ms
t : time, ms

Subscripts

delay : delay
eff : effective
eng : energizing
inj : injection

1. 서 론

디젤 엔진에서 커먼 레일 연료 분사 시스템은 고압으로 축압된 하나의 커먼 레일에서 여러 개의 연료 분사용 인젝터에 동일한 분사 압력을 공급할 수 있

*Corresponding author, E-mail: hksuh@kongju.ac.kr

고, 전자 제어가 가능하여 정확한 양의 연료를 분사할 수 있는 장점이 있다. 또한, 기존의 기계식 연료 분사 시스템의 디젤 연료 분사 압력보다 월등히 높은 분사 압력으로 연료의 미립화 특성이 증진되고, 실린더 내의 흡입 공기와 연료의 혼합 성능이 개선되어 적은 연료량으로도 충분한 출력을 낼 수 있는 초 희박 연소가 가능하다. 따라서, 연비 절감과 함께 엔진 출력 상승을 기대할 수 있고, 동시에 불완전 연소를 줄여 유해 배출가스의 양을 줄일 수 있는 장점이 있다.

기본적으로 분무의 미립화 성능을 개선하려면 고압으로 연료를 분사하거나, 노즐의 홀 직경을 작게 만들어 노즐로부터 분사되는 초기 액적의 크기를 줄이는 방법이 있다. 하지만, 노즐의 홀 직경이 줄어들면 그만큼 연료량 확보가 어렵고, 분무 액적의 운동량이 감소하여 연소실 내의 균일한 혼합기 형성에 어려움이 있다. 이와 같은 이유로, 노즐의 홀 개수를 늘이거나,¹⁾ 노즐 및 니들의 형상을 변경하거나,²⁾ 노즐 오리피스 형상을 변화시켜 분무 운동량을 증가시키고, 미립화 성능을 향상시키기 위한 연구를 수행하고 있다.^{3,4)}

노즐 및 오리피스 형상이 미립화 성능에 미치는 영향을 연구하기 위해서는 노즐 형상 최적화를 위한 액체 미립화 기초 기술이 정립되어야 하고, 초고압의 분사압력에도 견딜 수 있는 소재의 확보와 노즐 본체에 여러 개의 작은 홀을 가공할 수 있는 초정밀 기술과 가공 후 소재의 랩핑 기술이 동반되어야 한다. 하지만, 현재 국내에서는 관련 기술이 미숙하여 연료 분사용 인젝터 노즐의 국산화가 어려운 실정이다.

본 연구에서는 기본 직선형 연료 분사 방식을 스윙형 연료 분사 방식으로 변경하여, 액체의 미립화 성능을 개선하고자 하였다. 또한, 이와 같은 스윙형 연료 분사 방식은 기존 노즐 연료 분사의 문제점 중의 하나인 실린더 벽면에 연료의 충돌 분무로 인한 액막의 생성이 감소하고, 이로 인한 불완전 연소 특성이 개선되어 배출물 저감 특성에도 기여를 할 것으로 사료된다.⁵⁾ 따라서, 스윙 타입 노즐 시작품의 분사 특성 평가를 위하여 Bosch 법^{6,7)}을 참조하여 제작된 연료 분사 분석 장치(Fuel injection analysis system)를 이용하여 다양한 분사조건에서의 분사량(m_{inj}), 분사율(Q_{inj}), 응답지연시간(t_{delay})을 측정하였다. 또한, 기존의 노즐과 비교 평가하여 스윙 타입 노즐의 실제 엔진 적용 가능성을 검토하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용되는 고압 연료 분사용 스윙 노즐 인젝터는 연료가 나선 형태로 분사되기 때문에 연료 분무의 운동량이 증가하여 미립화 효과가 극대화되고, 연소실내 균일한 연료 분포도를 기대할 수 있다. 또한, 연료 분사 방향의 변경으로 인하여 실린더 벽면의 연료 충돌로 인한 액막 생성도 감소하고, 이로 인한 배출물 생성도 억제 가능할 것으로 판단된다.^{1,5)} 고압 연료 분사용 스윙 노즐 인젝터의 분사 특성에 관한 연구를 수행하기 위하여 노즐 홀의 유효 면적(A_{eff}), 분사량(m_{inj}) 및 분사율(Q_{inj}) 특성을 실험적으로 연구하였고, 동일한 유효 면적을 가진 기본 노즐 인젝터의 분사 특성 결과와 비교 연구하였다.

Fig. 1은 본 연구에 적용된 스윙 노즐의 모습이다. 기본적인 노즐 홀 모양과는 다르게 타원 모양의 분사 홀로 구성되어 있으며, 동일한 유효홀 면적을 위해 기본 노즐의 홀수보다 4개가 많은 12홀로 제작하였다. 본 연구에 사용된 기본 노즐 및 스윙 노즐의 제원은 Table 1과 같다. 또한, 각각의 노즐 구동을 위한 인젝터는 솔레노이드 구동방식으로 최대 분사압력 160MPa인 커먼 레일 인젝터를 사용하여 연구를 수행하였다.

스윙 노즐 인젝터의 분사 성능 평가를 위한 연료 분사 분석 장치(Fuel injection analysis system)는 연

Fig. 1 Swirl nozzle injector

Table 1 Specification of test nozzle

Nozzle type	Base nozzle	Swirl nozzle
Number of holes (ea)	8	12
Injection angle (°)	150	120

Fig. 2 Schematics of fuel injection analysis system

로 펌프의 가동을 위한 전동 모터와 연료를 고압으로 축압하고, 분사할 수 있는 커먼 레일 및 인젝터, 이들 장비를 제어할 수 있는 제어장치들, 분사 조건에 따른 연료의 분사량과 분사율을 측정할 수 있는 장치들로 구성하였다. 스윙 노즐이 장착된 인젝터의 분사량(Injection mass), 분사율(Injection rate), 응답시간(Injection delay)을 측정 평가하는 장치의 구성은 Fig. 2와 같다.

연료 분사 분석 장치(Fuel injection analysis system)는 실제 엔진에서 사용하는 고압 연료 펌프를 이용하여 최대 레일 압력 180MPa까지 연료 분사 및 제어가 가능하며, 고압 연료 펌프에 장착되어 있는 전동 모터는 입력 신호에 따라 4,000rpm까지 제어가 가능하다.

커먼 레일에서 생성된 고압의 연료를 분사하는 인젝터는 전용 제어 장비와 드라이버에 의해 분사 기간(t_{eng}) 및 분사횟수(N_{inj}), 분사 속도(rpm)를 제어하며, 분사압력(P_{inj})은 레일에 장착되어 있는 압력 조절 밸브(PCV)를 사용하여 제어하였다. 본 연구에 사용된 연료 분사 특성 측정 장치의 자세한 제원은 Table 2와 같다.

2.2 실험 방법

인젝터의 분사율을 측정하기 위한 측정 장비는

Table 2 Specification of fuel injection analysis system

POWER (V/Hz)	380/60
Motor (HP)	15 (Inverter type)
Motor speed (rpm)	0 ~ 4,000
Supply pressure (MPa)	low pressure pump : 0 ~ 0.4 high pressure pump: 0 ~ 4
Air pressure (MPa)	0 ~ 0.3

연료로 가득 채워진 관 내부로 연료를 분사할 때 발생하는 압력의 변화를 측정하여 분사율을 계산하는 Bosch's 법(장관법)을 적용한 측정 장비를 사용하였다.

스윙 노즐 인젝터의 실험 조건은 Table 3과 같이 분사 압력은 40MPa에서 160MPa까지 40MPa 간격으로, 분사 시간은 0.2ms에서 1.0ms까지 0.2ms 간격으로 설정하였다. 높은 분위기 압력조건에서 연료 분사량 비교 실험시 대기압의 조건보다는 실험의 재현성이 높은 장점이 있으므로, 실제 엔진의 운전 조건을 고려하여, 고압 연료 펌프의 작동 속도는 1,000rpm, 측정관내의 분위기 압력(P_{amb})은 2MPa로 설정을 하였다. 또한, 압력 레귤레이터를 설치하여 챔버 내의 분위기 압력은 설정 압력을 일정하게 유지하였다.

분사량은 연료 분사 후 측정 관을 통해 배출되는 연료량을 정밀 저울로 측정하였으며, 실험의 오차

Table 3 Nozzle test conditions

Injection pressure (MPa)	40 ~ 160
Injection duration (ms)	0.2 ~ 1.0
pump speed (rpm)	1,000
Ambient pressure (MPa)	2

를 줄이기 위하여 1,000회 연속 분사 후 평균값으로 결과를 정리하였다. 시험 결과, 분사량은 구간마다 평균 약 5% 정도의 편차를 보였고, 특히 저압 분사일 경우 편차가 큰 것으로 나타났다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 Test nozzle 유효 면적 비교 결과

Fig. 3은 스윙 노즐 인젝터 홀의 각각의 유효면적을 계산해 비교한 결과이다. 12개 홀의 평균 면적은 0.016mm^2 이고, 가장 큰 홀은 면적 0.033mm^2 로 평균보다 2배가량 크고 가장 작은 홀은 0.004mm^2 로 평균에 비해 1/4배가량 작았으나, 대체적으로 균일한 가공 정도를 보였다. 모든 홀의 유효 면적을 합한 값은 0.196mm^2 로 기본 노즐 인젝터의 유효 면적값 0.2mm^2 와 거의 차이가 없어 거의 동일한 유효 면적의 실험 조건에서 연구를 수행하였다.

Fig. 3 Comparison of effective hole area (A_{eff}) in swirl nozzle

3.2 Test nozzle 분사량 비교 결과

Fig. 4는 펌프 회전 속도 1,000rpm, 분위기압 2MPa의 조건에서 분사압력과 분사시간에 따른 스윙 노즐 인젝터와 기본 노즐 인젝터의 분사량을 비교한 결과이다. 연구 결과에서 나타난 바와 같이 분사압

Fig. 4 Comparison of injection mass in various test conditions

력이 증가될수록 기본 노즐과 스윙 노즐의 분사량의 차이가 점점 커지는 것을 볼 수 있었다. 또한, 각 노즐의 동일한 분사조건에서의 평균 분사량과 최대·최소 분사량 값과의 차이는 분사압력(P_{inj})이 낮을수록, 분사시간(t_{eng})이 짧을수록 증가하는 경향을 보였다. 이는 분사압력이 낮을수록, 또한, 분사시간이 짧을수록 노즐 내부 니들의 개방(Open)에 필요한 연료의 축압량이 작아지고, 니들 들림(Needle lift)이 일정하지 못해 불안정한 연료 분사 특성을 보인 결과, 분사되는 연료량 자체도 동일한 결과를 보이지 못해 평균값과의 편차가 커지는 것으로 판단된다.

3.3 Test nozzle 분사율 비교 결과

Fig. 5는 기본 노즐 인젝터와 스윙 노즐 인젝터의 분사압력(P_{inj})의 변화에 따른 분사율 특성의 비교와 분사 지연 시간(t_{delay})을 나타낸 결과이다. 스윙 노즐 인젝터의 초기 연료 분사 특성을 기본 노즐 인젝터와 비교한 결과, 분사시작 후 0.5ms 지점에서 스윙 노즐의 분사율 값이 $23.03\text{mm}^3/\text{ms}$ 로 기본 노즐의 결과인 $20.92\text{mm}^3/\text{ms}$ 보다 약 10%가량 빠른 상승률을 보였다. 또한, 공통적으로 분사압력이 높아질수록 최대 분사율이 증가하였다. 기본 노즐과 비교하여, 스윙 노즐의 최대 분사율이 약 2~5% 가량 높은 수치가 나왔는데, 이는 분사량의 증가와 비례해서 분사율도 높아지기 때문이다. 특히, 160MPa의 분사압력 조건의 경우, 분사 시작 후 0.5ms 이후에 스윙 노즐 인젝터의 분사율 증가 기울기가 기본 노즐과 비교하여 다소 감소하기는 하나, 기본 노즐이 분사 시작

Fig. 5 Effect of injection pressure on the injection rate characteristics ($P_{amb} = 2\text{MPa}$, $t_{eng} = 1.0\text{ms}$, $n = 1,000\text{rpm}$)

Fig. 6 Effect of energizing duration on the injection rate characteristics under low injection pressure condition ($P_{inj} = 40\text{MPa}$, $P_{amb} = 2\text{MPa}$, $n = 1,000\text{rpm}$)

후 0.72ms에서 분사율 증가가 둔화된 것에 비하여, 스윙 노즐의 경우에는 0.76ms까지 계속 증가하였고, 최대 분사량을 유지하며 안정적인 분사를 하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과로부터, 고압 분사 조건에서의 스윙 노즐의 분사 특성이 기본 노즐에 비하여 우수하다고 판단된다. 분사 지연 시간(t_{delay})은 0.35ms로 동일한 결과를 보였으며, 연료 분사 완료 후 분사율의 후기 딜레이가 길어지는 것은 압력 파형을 이용해 분사율 특성을 측정하는 장비의 특성상 연료 분사 완료 후에도 관내에 맥동이 남아 압력 센서에 영향을 주기 때문으로 판단된다.

분사압력이 저압이고, 분사 기간이 짧은 조건에서의 스윙 노즐 인젝터의 연료 분사 안정성을 기본 노즐 인젝터와 비교하기 위하여, Fig. 6은 분사압력 (P_{inj})이 저압($P_{inj} = 40\text{MPa}$)인 경우, 분사 기간(t_{eng})별

로 연료 분사율(Q_{inj})과 분사 지연시간(t_{delay})을 비교하였다. 실험 조건은 분사압력 40MPa에 분사시간을 0.4 ~ 1.0ms로 변화시켜가며 실험하였다. 연구 결과, 최대 분사율은 앞서한 실험과 마찬가지로 기본 노즐과 비교하여 스윙 노즐이 모든 실험조건에서 높은 결과 값을 보였다. 이와 같은 결과로부터 낮은 분사 압력, 짧은 분사 기간 조건일 때의 스윙 노즐 인젝터의 분사 성능은 기본 노즐 인젝터와 비교하여 동일하거나 우위에 있다고 판단된다. 분사지연 시간(t_{delay})은 기본 노즐이 0.38ms, 스윙 노즐은 0.37ms로 나타나는데, 이는 실험적인 오차라고 생각해도 될 만큼 근소한 차이였다.

Fig. 7은 고압 분사 조건($P_{inj} = 160\text{MPa}$)일 때 분사 시간별로 분사율과 분사 지연시간을 비교한 그림이

(a) Base nozzle injector

(b) Swirl nozzle injector

Fig. 7 Effect of energizing duration on the injection rate characteristics under high injection pressure condition ($P_{inj} = 160\text{MPa}$, $P_{amb} = 2\text{MPa}$, $n = 1,000\text{rpm}$)

다. 실험 결과, 분사 압력이 저압일 때의 실험 결과와 비슷하게 모든 실험 조건의 최대 분사율은 기본 노즐 인젝터보다 스윙 노즐 인젝터가 우위에 있으며, 특히 분사시간이 짧은 조건에서 더 우수한 성능을 나타내었다. 분사 지연시간(t_{delay})은 기본 노즐 인젝터와 스윙 노즐 인젝터 모두 0.35ms로 같은 수치를 보여 주었다.

4. 결 론

본 연구에서는 커먼 레일 분사시스템에서 연료 미립화 성능 개선을 위하여 시작품으로 개발된 스윙 노즐 인젝터의 분사 성능을 연구하기 위하여 연

료 분사 분석 장치를 이용하여 분사량(m_{inj}), 분사율(Q_{inj}), 분사지연시간(t_{delay})을 실험 평가하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동일한 분사조건에서 분사량의 편차는 분사압력(P_{inj})이 낮을수록, 분사기간(t_{eng})이 짧을수록 커지는 경향을 보였다. 이는 분사압력이 낮을수록, 또한, 분사기간이 짧을수록 연료 분사를 위한 니들 들림(Needle lift)이 불안정해져 분사되는 연료량 자체도 동일한 값을 보이지 않기 때문이다.
- 2) 서로 다른 노즐의 연료 분사특성을 비교 연구한 결과, 실험 조건과 무관하게 기본 노즐 인젝터와 비교하여 스윙 노즐 인젝터의 최대 분사율이 약 2~5%가량 높았다. 이는 분사량 연구 결과에서 예상하였듯이 스윙 노즐의 분사량의 증가와 비례해서 분사율도 높아진 결과이다.
- 3) 종합적으로 스윙 노즐 인젝터의 분사 성능이 모든 실험 조건에서 기본 노즐 인젝터와 비교하여 동일하거나 우위에 있다고 판단된다.

References

- 1) D. J. Kim, G. S. Lee, H. C. Kim, W. Kang and S. S. Kwak, "A Study on the Injection Rate Characteristics of the Injector with a Swirl Nozzle for Diesel Common Rail Systems," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.29-32, 2011.
- 2) Y. G. Kim and J. I. Ryu, "Atomization Characteristics for Various Injection Nozzle Type and Property Changes," Transactions of KSAE, Vol.18, No.4, pp.62-67, 2010.
- 3) J. W. Son, K. J. Cha and D. J. Kim, "A Study on the Enhanced Atomization of Single Hole Nozzle by Orifice Shapes," Transaction of KSPSE Fall conference, pp.67-72, 2001.
- 4) S. H. Park, H. K. Suh and C. S. Lee, "Effect of Nozzle Orifice Shape and Nozzle Length-to-diameter Ratio on Internal and External Flow Characteristics of Diesel and Biodiesel Fuel," Transactions of the KSME B, Vol.31, No.3, pp.264-272, 2007.
- 5) S. S. Kwak, I. M. Md, G. S. Choi and H. M. Cho, "Fuel Spray Characteristics and Perform-

- ance Analysis of a Swirl Direct Common Rail Injector (SDCRi)," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1-6, 2009.
- 6) W. Bosch, "The Fuel Rate Indicator: A New Measuring Instrument for Display of the Characteristics of Individual Injection," SAE 660749, 1966.
- 7) J. H. Woo, S. W. Park, H. S. Chon and C. S. Lee, "Effect of Nozzle Geometry on the Injection Rate Characteristics of Common-rail Diesel Injector," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.354-359, 2003.