

## 8홀 노즐을 적용한 2리터 급 디젤 엔진 연소 최적화

권 순혁\* · 김 민 수 · 최 민 선 · 조 성 환

현대자동차 연구개발본부 선행디젤엔진개발팀

## Combustion Optimization of Diesel 2.0 Liter Class Engine with 8-hole Injector Nozzle

Soonhyuk Kwon\* · Minsu Kim · Minseon Choi · Sunghwan Cho

Advanced Diesel Engine Development Team, Namyang R & D Center, Hyundai-Kia Motor Company, 772-1 Jangdeok-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 9 August 2007 / Accepted 26 November 2007)

**Abstract** : Atomization speed of diesel fuel injected from 8-hole nozzle is faster than that of 7-hole nozzle because the hole diameter of 8-hole nozzle is smaller than that of 7-hole nozzle. But both insufficient distance between the fuel sprays and short penetration of injected sprays through 8-hole nozzle hole cause many harmful effects on combustion. In this study, we installed the 8-hole injectors to diesel 2.0 liter class engine, and optimized in-cylinder swirl and penetration via selecting and matching proper cylinder head and combustion bowl. Through this process, we found out the performance and emission potential of 8-hole nozzle installed engine are better than those of 7-hole nozzle installed one.

**Key words** : Swirl(스월), Penetration(관통도), Dipen code(다이펜 코드), Combustion bowl(연소실)

### 1. 서론

엔진 연소실 내부의 연소 과정은 화학 에너지가 또 다른 에너지들로 변환되는 과정이다. 자동차에 필요한 운동에너지로의 에너지 변환을 최대화하기 위해서는 각종 배기규제나 엔진 설계 제한사항을 만족하면서 고객이 원하는 성능을 가지도록 연소계, 공기, 연료에 관한 항목을 적절히 조합하여야 한다. 현재 승용디젤엔진에는 연소품질을 높이기 위해 커먼레일을 사용하여 연료 분사압력을 높이고, SCV(swirl control valve)를 채용하여 각 운전영역별로 공기 유동을 변화시키고 있다. 필요 목적에 따라 연료의 조기, 지연 및 분할 분사방법도 통용되고 있다. 분무 연료 입자의 미립화를 위해 인젝터 노즐

의 홀 수가 점차 증가하고 있으며, Toyota사의 Avensis 차량 엔진의 경우 10홀 인젝터가 적용되어 양산되고 있다. 당사의 D 엔진도 5홀에서 7홀으로 변경 양산되고 있으며 향후 더 많은 노즐 분공을 채택할 가능성이 있다. 본 연구에서는 강화되고 있는 배기 규제에 대응하기 위해 현재 7홀 노즐이 적용되어 양산되고 있는 디젤 2.0리터 엔진에 동일 유압유량을 갖는 8홀 노즐을 적용하고, Dipen Code를 적용해 연소인자를 최적화하여 노즐 다공화를 통한 배기 배출물 저감의 가능성을 확인하고자 하였다. 동일 유압유량 조건에서 분공 수가 변하게 되면 분무된 연료의 관통도(penetration)와 분무 간의 간격이 변화하며, 분공의 크기 변화로 분사 연료입자의 크기 또한 달라진다. 일반적으로 분사된 연료의 관통도는 연소실 가스 밀도가 증가에 따라 감소하고, 분

\*Corresponding author, E-mail: kshyuk@hmc.co.kr

사 압력과 오리피스 직경이 커지면 증가하는 관계가 있다.<sup>1-3)</sup> 연소실 스월이 강할수록 연소 후반부의 연소속도가 빨라져 매연 발생이 저감되는 것이 일반적이며, 더 많은 노즐 분공을 갖는 동일 유압유량의 노즐을 사용하면 분공 직경이 감소하여 연료입자 크기가 감소하고, 이에 따라 공기와 연료의 혼합이 촉진되어 연소특성이 개선되고, 디젤 수트(soot)의 산화가 촉진된다.<sup>4)</sup> 그러나 분무 간 간격이 좁아지고, 분무 길이가 짧아짐에 따라 기존 연소실과 전자제어장치 보정(ECU mapping)만으로는 이론적 이득을 얻기 힘들다. 본 연구에서는 연소실 직경과 헤드 스월, 전자제어장치 보정을 통하여 8홀 노즐 적용으로 얻을 수 있는 성능 및 배기가스 개선 가능성을 확인할 수 있었다.

## 2. 본 론

### 2.1 시험 장치

본 연구의 엔진 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Test engine specification

Item	Specification
Engine model	D-2.0 engine
Cylinder arrangement	4 in-line
Compression ratio	16.3
Valve system	4 valves/cylinder
Head swirl ratio	1.20-1.67
Fuel system	Common rail direct injection (Max. P.=1600bar)

Fig. 1은 본 연구에 사용된 연소실 형상이다. 각 연소실의 직경을 mm로 나타내었다.

7홀 노즐 적용 엔진의 연소실 직경은 49.0mm 이며, 8홀 노즐 시험 시에는 동일 압축비를 유지하면

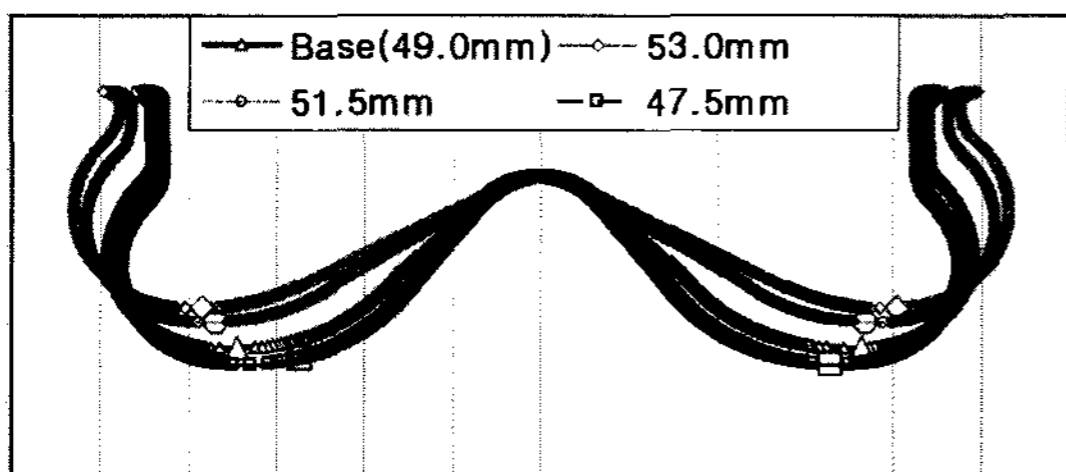


Fig. 1 Combustion bowl shape

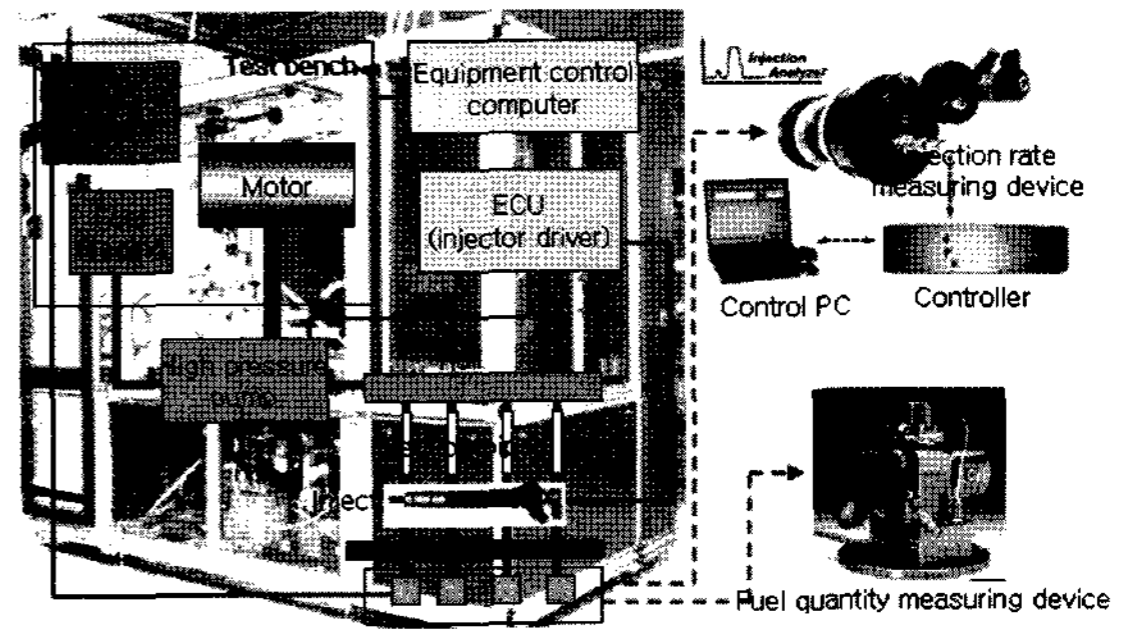


Fig. 2 Test apparatus (CI4000)

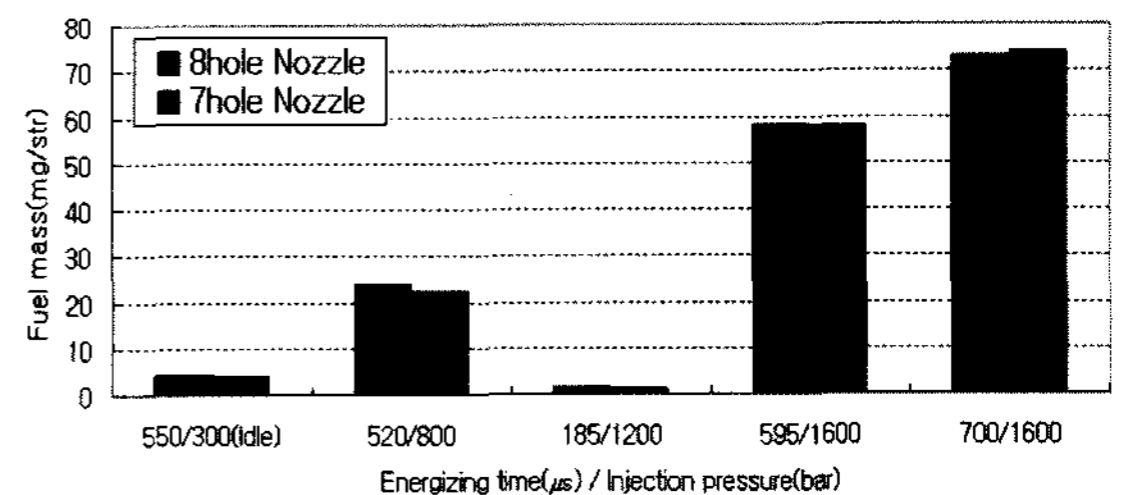


Fig. 3 Rig test result : Flow rate of nozzle

서 연소실의 직경을 47.5mm에서 53.0mm까지 변경하여 스월을 변화시킨 연소실을 사용하였다. 엔진 시험은 AVL사 160kw EC 다이내모 미터에서 수행되었다. 디젤 매연 측정은 AVL 415S, 연료량 측정은 AVL 735 장비를 사용하였다. NOx, THC, CO, CO<sub>2</sub> 등 배출 가스는 Horiba MEXA 9100HEGR로 측정하였다. 연소압력은 D2T사 OSIRIS EVOLUTION 2로 측정하였고 연소 소음은 측정된 연소압력으로부터 계산하였다. 노즐 유량은 Fig. 2의 Moehwald사 CI4000 장비로 측정하였다.

Fig. 3은 시험에 사용된 인젝터에 대한 유량 시험 평가 결과를 도시한 것이다. Bosch 사(독일)의 7, 8홀 피에조 인젝터(CRI3.2)이며 분공은 1열 등 간격으로 가공되어 있다. 유압유량은 분사압력 100bar 조건 420cc/30sec, 분무 각도(cone angle) 155도 사양이다. 즉, 동일한 사양으로 노즐 분공 수만 각각 7홀, 8홀로 다른 사양을 4개씩 구매하여 엔진 시험에 적용하였다. 시험 적용 전에 리그 장비로 유량평가를 실시하여, 제품 생산 편차에 따른 특성을 확인하였다. 그 유량 평가 결과 최대 출력점 분사조건인 분사압력 1600bar, 분사시간 700 $\mu$ s 조건에서 7홀 노즐 4개의 유량 평균(74.025mg)이 8홀 노즐 유량 평균

(73.025mg)보다 약 1mg(1.3%)높았으며, 동일 조건에서 7, 8홀 각 4개 노즐의 평균 유량값에 대한 개별 노즐의 최대 유량 편차 수준도 7홀(0.9mg, 1.2%)보다 8홀 노즐(2.1mg, 2.9%)이 높은 수준이었다. 부분 부하 분사조건을 대변하는 분사압력 800bar, 분사시간 520 $\mu$ s에서는 7홀 노즐 유량 평균이 22.33mg, 8홀 노즐 유량 평균이 23.85mg으로 나타났다.

2.2 평가 방법

in-bowl swirl(이하 ‘스웰(swirl)’ 으로 통칭) 및 연료 분무의 relative penetration(이하 ‘상대적 관통도(rel. penetration)’으로 통칭)값은 Ricardo사(영국)에서 개발하여 사용 중인 Dipen Code를 사용하여 수치화 하였다. Dipen Code는 노즐 홀 직경과 개수, 연소실 직경과 압축비, 분사시기와 분사기간, 공기와 연료의 주요 물성치 등을 입력하였을 때 연소실 내의 스웰과 상대적 관통도를 수치화 하여 출력해 주는 프로그램이다. Fig. 4는 Dipen Code로 계산한 노즐 별 연소실 스웰과 상대적 관통도를 도시하였고, 연소계 선정 순서도 나타내었다. 상대적 관통도는 노즐 오리피스 출구로부터 연소실 벽면까지의 거리 대비 분무의 길이 비로 나타내어지며, 분무가 연소실 벽면에 다다를 경우를 1로 나타낸다. 최초 기본 연소실 및 7홀 노즐 적용시의 Dipen Code계산 결과를 참고하여 8홀 노즐의 예상 최적 스웰 및 상대적 관통도 값을 선정 하였다.

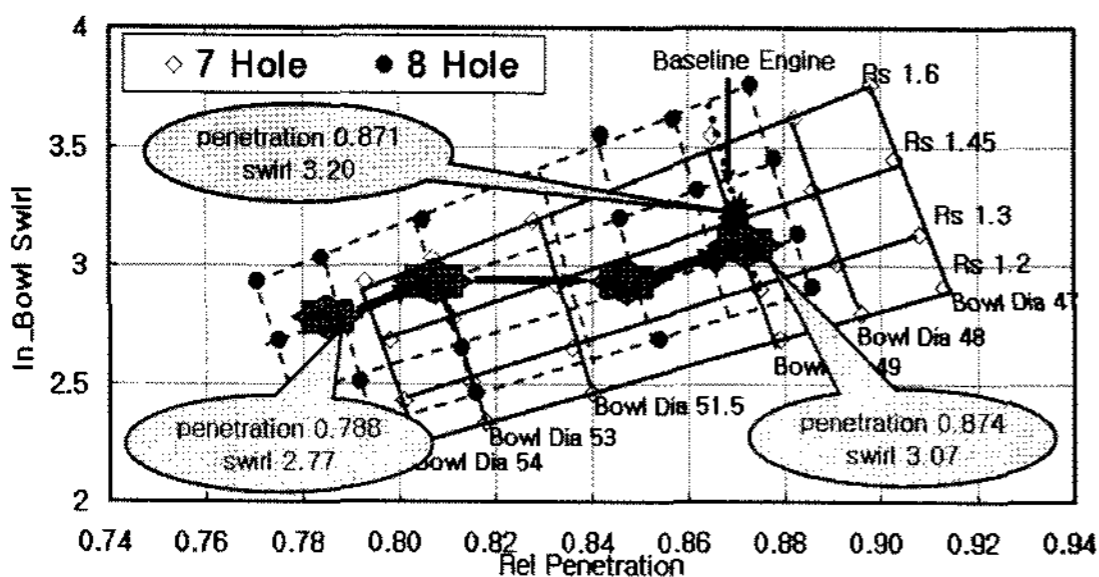


Fig. 4 Calculation results using Dipen Code

2.3 시험 결과

2.3.1 1차 연소계 선정(연소실 직경 53.0mm)

7홀 인젝터 노즐이 적용된 본 엔진은 엄격한 개발 과정을 거쳐 연소를 최적화 한 후 양산되고 있는 엔

진이다. 여기에 분무 간 간격이 더 좁은 8홀 노즐을 적용하여 7홀 노즐 수준의 최적 연소를 구현하기 위해서는 Dipen Code계산 스웰값이 7홀 노즐을 적용했을 때인 3.20 보다는 작아야 할 것이다. 이를 위하여 연소실 직경 53.0mm와 헤드 스웰비(head swirl ratio(Rs.)) 1.20, 1.45, 1.67인 헤드를 1차 연소계로 선정하였다. 각 시험결과는 7홀 노즐 적용 시험결과 값을 기준으로 하여 상대 값으로 표기하였으며, 4000rpm에서는 레일압력 1600bar, 1000rpm에서는 레일압력 700bar 일 때의 시험결과를 기준(baseline) 값으로 설정하였다.

Table 2는 7홀 노즐과 8홀 적용 시의 Dipen Code 계산결과를 나타낸 표이다. 8홀 노즐 장착 시 헤드 스웰비 변화에 따라 스웰 값은 큰 폭으로 변화하지만 상대적 관통도 값은 동등 수준이었다.

Fig. 5는 1차 선정 연소계의 헤드 스웰비 변화에 따른 전부하 평가결과를 나타낸 표이다. 출력과 연료소비율(BSFC)은 7홀 시험결과와의 차이를 7홀 노즐 시험 결과 값에 대한 백분율로 나타내었고 매 연은 FSN 값으로 나타낸 8홀 노즐 시험결과와 7홀 노즐 결과 값의 차로 도시하였다. 스웰 변경에 따라 결과가 크게 변하지만, 7홀 인젝터 적용 결과와의 차이는 크다. 헤드 스웰비 1.45(스웰 2.77) 일 때 성능 특성이 가장 유리하였고, 이를 통해 8홀 노즐에 적

Table 2 Dipen code calculation results (1st hardware)

4000rpm full load	Swirl	Rel. penetration
7hole baseline	3.20	0.87
8hole, Rs1.20	2.34	0.79
8hole, Rs1.45	2.77	0.79
8hole, Rs1.67	3.03	0.78

- Bowl diameter = 53.0mm

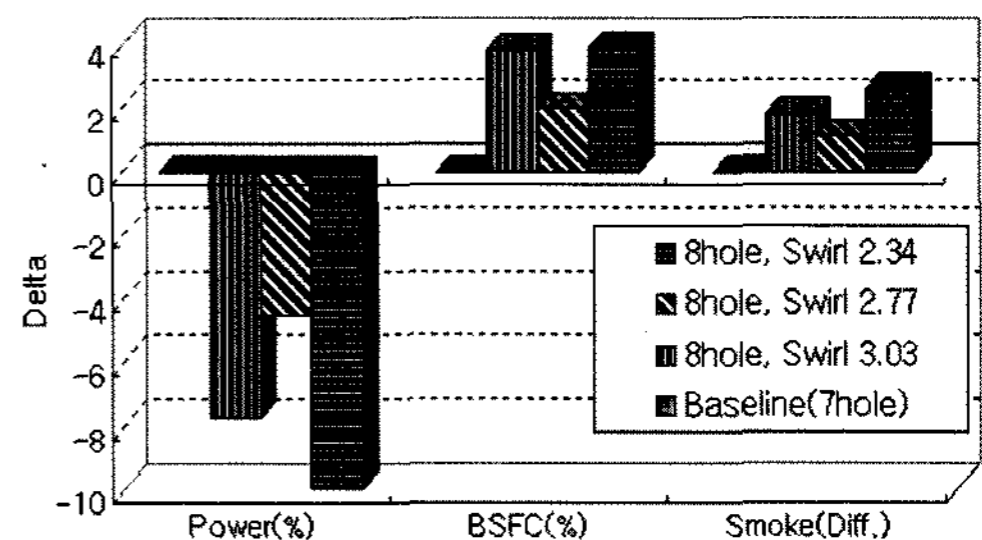


Fig. 5 Test results of in-bowl swirl sweeps for 1st hardware

Table 3 Test results of rail pressure sweeps for 1st hardware

Spec.	Rail P. [bar]	Rel. penetration	Power*	BSFC*	Smoke*
7hole	1600 (baseline)	0.87	-	-	-
	1800	0.89	+2.71%	-0.16%	-10.7%
8hole Rs1.67	1600	0.78	-	-	-
	1800	0.80	+4.22%	-2.47%	-13.7%

\* Increment/ decrement ratio with respect to baseline test results (%)  
 - BSFC : Brake specific fuel consumption

합한 스웰 강도를 대략적으로 예측 가능하였다. 분무의 관통도는 통상 분사압력에 비례하여 증가한다.<sup>4,5)</sup> Table 3은 상대적 관통도 증감에 따른 영향을 확인하기 위해 4000rpm 전부하에서 분사압력 변경 시험을 실시한 결과이다. 53.0mm 연소실에서 상대적 관통도 증가에 따른 연료소비율과 매연 배출량 개선 폭이 7홀 노즐을 적용한 엔진의 동일 시험결과에 비해 월등히 컸다. 이는 분사압력 내구한계점 (1600bar)에서 8홀 노즐을 통한 연료 분무의 길이가 연소실 직경에 비해 너무 짧아 연소실 외곽공기가 연소에 관여하지 못했다는 것을 의미한다.

### 2.3.2 2차 연소계 선정(연소실 직경 51.5mm)

2.3.1의 시험 결과로부터 Dipen Code로 계산된 스웰값이 2.77일 때 분무 간섭이 최소임이 추정 가능하였으며, 분사압력 변경 시험결과 7홀 적용 평가결과 대비 성능 향상 폭이 현저하게 컸기 때문에 상대적 관통도의 증대가 필요하였다. 이를 위해 연소실 직경을 53.0mm에서 51.5mm로 축소하고, 연소실 최적 스웰을 선정하기 위해 헤드 스웰비 변경 시험을 진행하였다.

Table 4는 2차 선정 연소계와 8홀 노즐을 적용하였을 때, 4000rpm 전부하 및 분사압력 변경 시험 결과이다. 직경 51.5mm 연소실과 헤드 스웰비 1.45와 1.30를 적용 시에 Dipen Code로 계산된 스웰 값은 각

Table 4 Test results of 4000rpm full load for 2nd hardware

Spec.	Rail P. [bar]	Power*	BSFC*	Smoke*	Swirl	Rel. penetration
8hole Rs1.45	1600	-1.84%	+0.67%	+44.0%	2.92	0.81
	1800	+0.79%	-0.83%	+25.8%	2.92	0.83
8hole Rs1.30	1600	-1.12%	+1.74%	+72.3%	2.65	0.81

\* Increment/ Decrement ratio with respect to baseline test results (%)

각 2.92와 2.65이며, 연소실 직경 감소로 상대적 관통도도 0.81까지 증가되었다. 4000rpm 전부하 평가 결과 헤드 스웰비가 1.45인 경우가 1.30인 경우보다 연료소비율과 매연 배출량이 적었다. 그러나 출력은 약 1.6% 낮게 나타났는데, 이는 공조량 차이와 시험 오차 영향으로 동일 배기온도에서 연료가 1.2mg/stroke 적게 투입되어 나타난 결과로 판단된다. 7홀과 8홀 모두 공연비가 20.5 보다 큰 영역에서는 비슷한 출력 경향을 보이고 있으나 연료량이 증대됨에 따라 8홀 노즐의 터빈 입구온도가 내구 한계까지 빠르게 상승하여 더 이상의 출력상승은 불가능하였다. 분사압력을 1600bar에서 1800bar로 증가시키면 출력 2.69%, 연료소비율 1.49%, 매연배출이 12.7% 개선되었으며, 7홀 시험 결과(Table 3)와 비교 시 연료소비율의 개선이 두드러졌다. 이는 1800bar 분사압력 적용으로 상대적 관통도가 증가함에 따른 연소 개선 정도가 7홀 노즐에 비해 커서 더 많은 추가 출력 개선이 나타났기 때문으로 보인다.

Table 5 Test results of 4000rpm full load from combustion analyzer

Spec.	Injection timing [BTDC]	Burn rate 10% [BTDC]	Burn rate 50% [BTDC]
7hole(baseline)	Base	2.3	-15.9
8hole(Rs1.45)	-0.9*	1.4	-15.7
8hole(Rs1.30)	-1.0*	1.3	-16.0

\* Relative value with respect to baseline test results

Table 5에 연소해석기로 측정된 연소 데이터를 표시하였다. 7홀 노즐 장착 시험결과를 살펴보면, 누적 열 발생율 50% 지점까지의 기간이 8홀 결과보다 크랭크 각 기준으로 1° 가량 길지만 실제 매연배출량과 터빈입구온도는 낮다. 이는 7홀 노즐 연소계의 연소 후반부의 연소속도가 더 빠르다는 것을 의미한다. 후연소 기간이 단축되면 매연이 저감되고 터빈입구온도가 감소해 연료 추가 투입이 가능하므로 전부하 성능에 유리하다.

### 2.3.3. 3차 연소계 선정(연소실 직경 49.0mm)

2.3.2의 시험 결과는 동일 연소실 직경(51.5mm)에서 Dipen Code로 계산한 연소실 스웰이 2.65수준보다는 2.92정도의 수준이 적절하며, 분사압력 변경

시험 결과 현재 8홀 인젝터 적용 연소계의 상대적 관통도가 더 증대되어야 한다는 것을 제시하고 있다. 상대적 관통도 증대를 위해 연소실 직경을 51.5mm에서 49.0mm로 감소시키고, 헤드 스월비 1.30인 헤드를 사용하였다.

아래의 Table 6 및 7은 직경 49.0mm 연소실을 적용 4000rpm 전부하 시험결과를 기재한 것이다. 스월을 2.90수준으로 설정하기 위해 헤드 스월비 1.30을 장착하였고, 이때의 상대적 관통도는 0.85로 7홀 노즐 적용 시의 0.87과 거의 대등한 수준이다. 매연 배출량은 7홀 엔진 대비 3.14% 저감되었으나, 전부하 경제조건하에서 투입 연료량이 같음에도(58.6mg/stroke) 7홀 엔진 대비 최대 출력이 약 0.85% 미달되었다. Table 6의 최고 출력점 분사압력 변경 시험결과 출력 2.33%, 연료소비율 1.14%, 매연배출이 약 13.0%가 각각 개선되었다. 연소실 직경과 분무 길이의 함수인 상대적 관통도는 연료소비율 증감의 주된 요인이고, 7홀 노즐의 경우 동 연소실 조건에서 분사압력 변경 시 연료소비율이 0.2%개선됨에 그친 것과 비교하면, 8홀 노즐과 49.0mm 연소실 조합의 경우 상대적 관통도가 다소 부족하다고 볼 수 있다. 이러한 요인에 근거하여 출력과 연료소비율이 7홀 노즐에 대비하여 다소 열세한 결과가 나타났다고 판단하였다.

8홀 노즐 연료량 변경 시험 결과 최고 출력 점에서 출력, 연료소비율은 7홀 노즐 장착 엔진의 1% 내

Table 6 Test results of 4000rpm full load for 3rd hardware

Rail P. [bar]	Power*	BSFC*	Smoke*	Swirl/Rel. penetration	Spec.
1600	-0.85	+0.83	-3.1	2.90/0.85	8hole Rs. 1.30
1800	+1.45	-0.32	-15.7	2.90/0.87	

\* Increment/ decrement ratio with respect to baseline test results (%)

Table 7 Comparison of 4000rpm full load test results for baseline and 3rd hardware

Spec.	Intake air mass*	Fuel mass*	Max. cylinder pressure*	Exhaust gas temperature*
7hole baseline	-	-	-	-
8hole Rs 1.3	+1.7%	+0.0%	+0.3%	-0.2%

\* Increment/ decrement ratio with respect to baseline test results

외까지 거의 근접하며 매연 배출량은 비교적 우세한 결과를 나타내고 있다(Table 6). 그러나 7홀 노즐 평가시의 흡입 공기량이 8홀 노즐 평가시보다 약 1.7%(Table 7참조)적음에도 동 연료량에서 배기온도 및 매연 배출이 거의 동등하며, 그럼에도 출력이 높다는 것은 7홀 노즐, Rs 1.45 헤드, 직경 49.0mm 연소실의 조합이 8홀 노즐, Rs 1.30 헤드, 직경 49.0mm 연소실 조합보다 연소 측면에서 우수하다는 것을 나타내고 있다.

Table 8의 1000rpm 전부하 시험 결과 동 공연비 (17.1)에서 연료소비율이 7홀 노즐 결과에 비해 약 1.6% 높으며, Table 9의 결과와 같이 분사압력을 600bar에서 900bar로 증가시키면 매연이 약 50% 감소하는 특징을 나타내었다.

이것은 분무의 상대적 관통도가 부족하여 공기이용률 부족으로 인해 연료소비율 및 토크가 열세하게 나타나고, 분사압력을 증가시키면 상대적 관통도와 연료 무화속도 증가로 공기와 연료의 혼합도가 증가하여 매연이 감소하는 것으로 볼 수 있다. 4000rpm 및 1000rpm 공히 매연배출량 수준이 7홀 노즐 결과와 동등 또는 우세한 결과를 얻었으며, 이를 통해 연소실 내부의 스월 강도는 적절한 수준까지 이르렀음을 알 수 있다.

Table 8 Comparison of 1000rpm full load test results for baseline and 3rd hardware(A/F ratio=17.1)

Spec.	Torque*	BSFC*	Smoke*	SCV duty	Burn rate 10~50% [deg]
7hole baseline	-	-	-	69.6%	7.4
8hole Rs1.30	-1.7%	+1.6%	-29.8%	90.0%	7.9

\* Increment/ decrement ratio with respect to baseline test results

Table 9 Test results of rail P. sweeps(1000rpm full load)

Spec.	Rail P. [bar]	Torque*	BSFC*	Smoke*	Fuel mass [mg/str]
8hole Rs1.30 D=49mm	600	-	-	-	36.6
	700	-0.1	-0.2	-27	36.7
	800	-0.8	+0.4	-37	36.7
	900	-1.1	+0.3	-50	36.8

\* Increment/ decrement ratio with respect to the results when rail pressure = 600bar

2.3.4 4차 연소계 선정(연소실 직경 47.5mm)

Dipen Code 계산 결과 값 상으로 8홀 노즐에 적절한 스월 값은 대략 2.9 수준이라는 것을 위의 평가결과를 토대로 판단 가능하다. 그러나 상대적 관통도는 추가 증대가 필요하여 연소실 직경을 축소하여 시험을 실시하였다.

Table 10은 직경 47.5mm 연소실을 적용하여 최고 출력 점에서 시험한 결과이다. 4차 선정 연소실의 Dipen Code로 계산된 스월은 최적 예상치 2.9보다 다소 높은 3.07 수준이다. 보유한 헤드의 스월비 값은 1.20(스월 = 2.7)과 1.30이지만 연소실 스월 2.9를 만족시키기 위한 시험 샘플(헤드, 연소실)이 구비되지 않아 가장 가까운 스월값을 가지는 헤드(Rs1.30; 스월 = 3.07)를 사용하여 시험을 수행하였다.

4000rpm 전부하 평가 결과 7홀 노즐 대비 출력 0.53% 열세, 연료소비율 동등, 그리고 매연은 28.9% 증가 배출되었다. 출력 및 연비는 연소실 직경을 축소함에 따라 지속적으로 개선되는 경향이 나타났다. 분사압력 200bar 증압 시 증압 전에 비해 출력 1.66%, 연료소비율 1.07%, 매연배출량은 13.2% 개선되지만 배기 온도 감소가 적어 연료의 추가 투입에 한계가 나타났다. Fig. 6은 4000rpm 전부하 시험 결과이다. 47.5mm 연소실 채용 시, 분사압력 증가에 따른 배기온도와 매연 저감 폭이 49.0 및 51.5mm 연소실 채용 시에 비해 작은 것을 알 수 있다. 이는 분무의 길이가 증가되고 연소실 직경이 감소되어 연료입자의 연소실 벽면충돌이 발생함에 따라 정상 연소가 방해된 것으로 볼 수 있다.

Table 11에서 나타낸 것과 같이, 전부하 1000rpm 시험 결과 동일 공연비(17.5, spindt)기준으로 토크는 동등하였고 연료소비율 0.6% 개선, 매연은 50.8% 증가하였다. Table 12의 분사압력 변경 시험

Table 10 Comparison of 4000rpm full load test results for baseline and 4th hardware

Spec.	Power*	BSFC*	Smoke*	In-bowl swirl	Rel. penetration	Rail P. [bar]
7hole baseline	-	-	-	3.20	0.87	1600
8hole, Rs1.30	-0.53	-0.04	+28.9	3.07	0.87	1600
	+1.12	-1.11	+11.9		0.89	1800

\* Increment/ decrement ratio with respect to baseline test results(%)

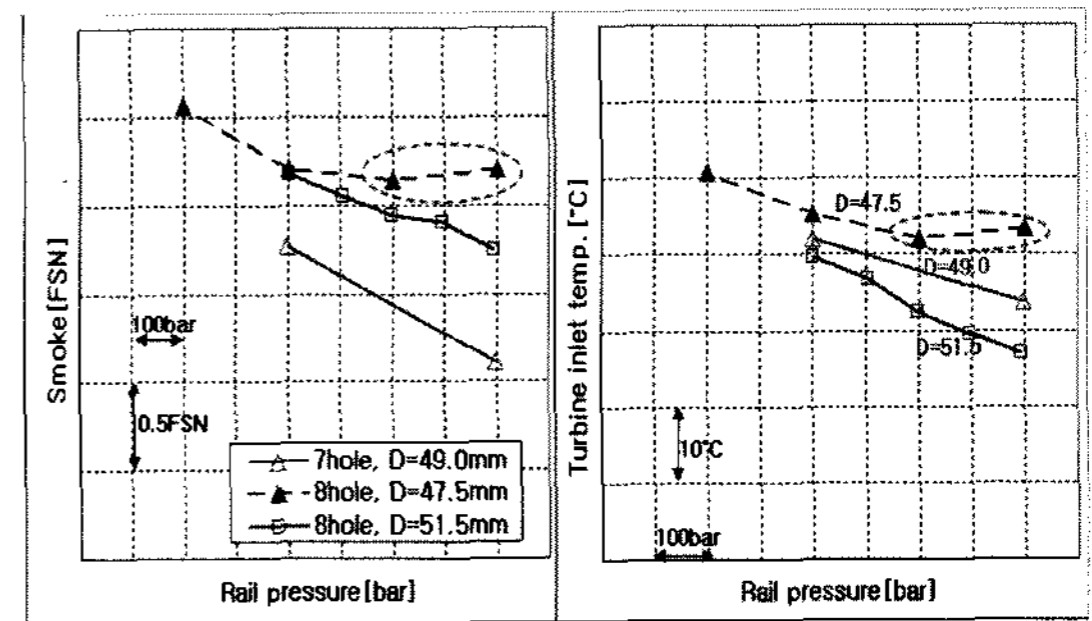


Fig. 6 Test results of rail P. sweeps(4000rpm full load)

Table 11 Comparison of 1000rpm full load test results for baseline and 4th hardware

Spec.	Torque*	BSFC*	Smoke*	AF ratio*	Burn rate (10~50%) [deg]
7hole baseline	-	-	-	17.5	7.2
8hole, Rs1.30	0.0	-0.6	+50.8	17.5	7.5

\* Increment/ decrement ratio with respect to baseline test results(%)

결과 성능 및 배출가스의 개선 폭이 앞의 49.0mm 시험결과(Table 9)와 비교 시 매우 미미한 수준이다. 위의 4000rpm 및 1000rpm 시험결과로부터 47.5mm 연소실을 적용하여 분사압력을 높이면 분무의 상대적 관통도가 최적 수준을 일부 초과하는 것으로 판단할 수 있다.

직경 47.5mm 연소실과 8홀 노즐을 적용하면 상대적 관통도는 적정 내지는 다소 높은 수준이며, 스월도 최적 예상치 2.9를 상회하여 이 두 가지 요인에 의해 매연 발생이 다소 증가한 것으로 보인다. 그러나 매연 발생이 증가했지만 양 자체가 많은 것은 아니었고, 출력이나 연료소비율은 7홀 엔진과 동등한 수준임을 확인하였다.

전부하 평가를 통해 8홀 노즐을 적용하여도, 7홀

Table 12 Test results of rail P. sweeps(1000rpm full load)

Rail P. [bar]	Fuel mass [mg/str]	Torque*	BSFC*	Smoke*
700	37.0	-	-	-
800	36.9	+0.2	-0.4	-11.2
900	37.0	+0.3	-0.3	-13.6

\* Increment/ decrement ratio with respect to the test results when the rail P.=700(%)

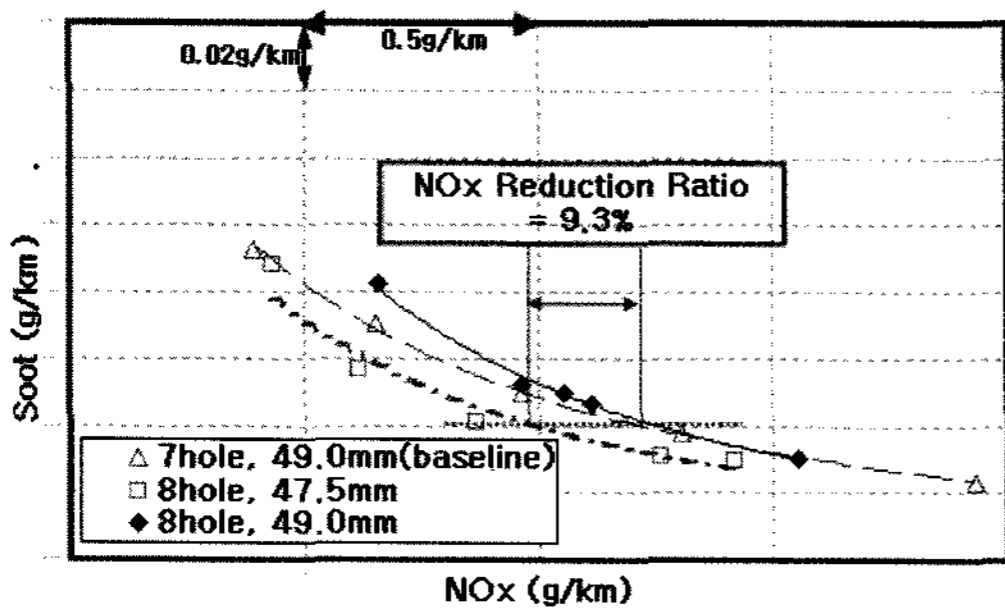


Fig. 7 Comparison of part load test results (NEDC 15 point)

Table 13 Comparison of part load test results(2000rpm BMEP 6bar)

Spec.	BSFC*	Smoke [FSN]	BSNOx	Noise [dB]	EGR rate [%]
7hole baseline	-	1.16	-	83.2	33.2
8hole 4th	-0.96%	1.15	-22.8%	82.3	36.8

\* Increment/ decrement ratio with respect to baseline data(%)

노즐과 동등한 성능을 얻을 수 있음을 확인하였으며, 이어서 부분부하 평가를 진행하였다. 부분부하는 차량 NEDC 모드 운전영역 중 대표 15개 시험 점을 선정하여 평가를 진행하였다.

Fig. 7에 나타낸 것과 같이 7홀 노즐 적용 시험 결과 대비 soot 기준에서 NOx는 약 9.3% 저감되었고, 연비(liter/100km)는 0.6% 소폭 악화되었다. 2000rpm / BMEP 11bar 이상은 배기 배출물 수준이 동등하였고, 2000rpm / BMEP 6bar이하 영역은 개선되었다.

EGR율이 높은 중속, 중간부하 이하의 영역에서는 분무 미립화로 인해 매연 배출량이 7홀 노즐 장착 시험 결과 대비 적었기 때문에 EGR 투입이 가능하여 NOx가 추가적으로 감소하였다.

Table 13에서처럼 매연 배출량 동일점에서 8홀 노즐 장착 시 EGR율이 다소 높은 경향을 나타내고 있었으며, 이는 8홀 분무로 인해 연료입자 미립화가 촉진되어 매연 저감에 따라 EGR 투입량을 늘릴 수 있어 NOx 저감이 가능하였다. 주요 5개 운전점 (2000rpm/BMEP2bar, 1500rpm/4bar, 2000rpm/6bar, 2500rpm/8bar, 2500rpm/14bar)연소 소음의 평균값은 7홀 노즐 시험결과와 동등 수준으로 나타났다(7홀 노즐 : 85.58dB, 8홀 노즐 : 85.54dB).

### 3. 결론

- 1) 본 연구를 통해 현재 7홀 인젝터가 탑재된 엔진에 8홀 인젝터를 성공적으로 적용하였다. 출력을 동등하게 유지하면서 배출가스 저감을 동시에 달성하였다.
- 2) 전부하 출력은 7홀 대비 약 0.5% 미달되었으나, 연료소비율은 동등하였다. 8홀 노즐의 최고 출력점 유량이 7홀 노즐에 비해 1.3% 열세하고 인젝터 간 유량 편차도 7홀 대비 큰 점을 감안하면 동등 수준의 전부하 성능을 가지는 것으로 볼 수 있다.
- 3) 8홀 인젝터 적용 NEDC 모드 대표점 부분부하 평가 결과 동 soot기준 NOx가 9.3%개선되었다. 연비는 0.6% 악화되었지만 연소 소음은 동등 수준으로 유지되었다. 8홀 노즐의 상대적으로 높은 유량 및 기통 간 노즐 유량편차 요인을 제거하면 배출가스 및 연비의 추가적인 저감이 가능하다.
- 4) 동 유압유량의 노즐일 경우 다공화에 따라 연소실 스웰은 다소 낮게, 상대적 관통도는 동등 수준으로 유지하는 것이 최적이며, Dipen Code를 적용하여 연소 관련 인자에 대한 대략적인 수치화 및 예측이 가능하였다.

### References

- 1) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, 1988.
- 2) H. Hiroyasu and M. Arai, "Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines," SAE 900475, 1990.
- 3) C. H. Lee, K. H. Lee and Y. J. Choi, "An Experimental Study on the Spray Behaviors of Swirl and Slit Injector to Direct Injection Spark Injection Engine," Transactions of KSAE, Vol.13, No.1, pp.19-27, 2005.
- 4) S. W. Park, S. H. Bang, K. H. Lee, C. S. Lee and J. H. Lee "Atomization Characteristics of Common-Rail Diesel Injector with Multi Hole," SAE 011833, 2003.
- 5) J. Benajes, S. Molina, K. De. Rudder, D. Maroteaux and H. Ben Hadj Hamouda, "The Use of Micor-orifice Nozzles and Swirl in a Small HSDI Engine Operating at a Late Split-injection LTC Regime," 10.1243/09544070 JAUTO383, IMechE, 2006.