韓國海洋工學會誌 第13卷 第3(Ⅱ)號, pp.47~55, 1999. 8

◉ 論 文

와류실식 소형 디젤기관의 연소실 형상이 기관 성능에 미치는 영향(Ⅱ)

라 진 홍*

(99년 7월 16일 접수)

The Effect of Combustion Chamber Shape on the Performance of Swirl Chamber in Diesel Engine(Ⅱ)

Jin-Hong Ra*

Key Words : Swirl Chamber(와류실), IDI Diesel Engine(간접분사식 디젤기관), Jet Passage Area(연락공 통로면적), Jet Passage Angle (연락공 경사각), Piston Top Cavity(피스톤 상부 홈)

Abstract

A study on swirl chamber for diesel engine is to realize lower fuel consumption and exhaust emission than the current marketing engines. Author formerly reported the performance characteristics of small IDI diesel engine with swirl chamber by changing the jet passage area and its angle, and the depth and shape of the piston top cavity.

Following after the first report[1], in this paper, the characteristics of fuel consumption, soot emission, and exhaust gas temperature were examined and analyzed after dimension of jet passage area expanded to 70.1㎟. The results were that the optimum values of the jet passage area depending on the depth of the piston top cavity were different at each engine speeds and loads, and in accordance with application of engine running conditions they were able to be selected as optimum dimensions of each design parameters.

1. 서 론

와류실식 디젤기관의 연소에 대한 연구는 저 공해성을 더욱 개선시키고 더 낮은 연비화를 실현하는 데 있다. 이를 위해서는 연소실 형상을 최적 설계하여 예혼합연소 제어와 확산연소의 연소성을 향상시키는 것이 중요하다.

와류실식 디젤기관의 초기 예혼합연소 억제와 확산연소 과정의 촉진은 와류실 속의 와류 및 난류의 속도 제어, 연락공의 흐름 특성 최적화, 그리고 주연소실 속의 화염분출 개선 등을 들 수 있다. 이와 관련한 주요 인자로서는 연락공의 통로면적 및 경사각 그리고 와류실 내부 및 피스톤 상부 홈(cavity)의 형상 등이다. 이들 인자들을 포함

* 정회원, 부경대학교 수산과학대학 실습선

한 연소실의 형상 설계의 경우, 개략적인 설계의 이론식과 반실험식[2]이 소개되고 있으나 그 오차의 범위가 크며, 오늘날의 설계 기법은 주로 축적된 경험에 의한 시행착오법으로 연소실 형상을 최적화하고 있다[3~5]. 그리고 시뮬레이션에 의한 접근에서도 설계 제작된 연소실 속에서의 연소 메커니즘에 대한 현상 분석에 한정되어 있다[6].

한편, 와류실식 연소실 형상의 고유 모델화를 시도하고 있는 국내의 경우, 경험적 기술 축적이 풍부하지 못하여 설계 기술 기반이 취약한 실정이다. 그러므로, 경험적 시행착오에 의한 설계법에 많이 의존해야하는 설계 특성상, 연소실 형상을 고유 모델화하는 데는 많은 어려움을 겪고 있는 것이 현실이다.

최적 연소실 형상 설계에 있어서, 우선적인 검토 방법 중의 하나가 설계 시 요구되는 주요 인자의 영향을 실험적으로 평가하는 것이다. 이에 따라 본 연구자는 설계 주요 인자인 연락공 통로면적, 피스톤 상부 홈의 형상 및 깊이 그리고 연락공 경사각이 기관성능에 어떠한 영향을 미치는가에 대해 1차적인 실험적 평가를 보고한 바 있다[6]. 보고 내용에서, 연락공 면적이 넓을수록 연료 소비율이 감소하는 것을 확인하였으나, 실험 범위를 넘어선 영역에 대해서는 이의 평가가 보류되었으며, 실험 방법상, 설계 제 인자들에 대한 평가를 분사시기와 연동하여 함으로써, 이들 인자들이 기관 성능에 영향하는 연관성을 독립적으로 규명하는 데는 한계가 있었다. 따라서, 이번 2차 보고에서는 연락공의 통로면적을 70.1㎟ 까지 증대시키고, 분사시기를 일정하게 한 후, 피스톤 상부 홈의 형상 및 깊이 그리고 연락공 경사각에 대한 연료소비율과 그을음농도 및 배기온도 특성을 실험 분석하여 재평가하였다.

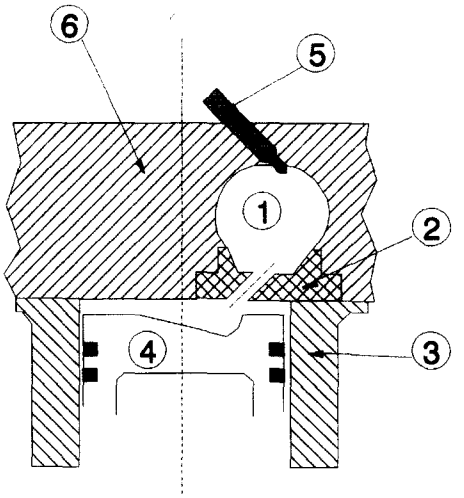
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

와류실식 디젤기관의 성능을 평가하기 위해 실험에 사용된 표준형 기관은 전형적인 와류실식 소형 디젤기관으로 그 제원은 Table 1에 주어져 있으며, 사용된 시험기관의 연소실 형상은 Fig. 1과 같다. 와류실 상부는 구형이고 하부는 밑면이 좁은 컵 모양을 하고 있다. 연락공 출구측의 주연소실은 그림과 같이 미연가스가 분출할 때, 화염선단이 피스톤 면에 접촉되는 부분이 파인 형을 하고 있다. 실험장치는 디젤기관을 비롯하여 동력계, 냉각계 그리고 회전수, 출력, 배기온도, 연료소비량 및 그을음농도를 계측하는 계측계로 되어 있으며, 이의 계략도는 Fig. 2와 같다.

Table 1 Specifications of test engine

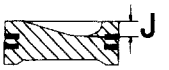
Engine Type			Water Cooled, 4 Cycle, 3 Cylinder Diesel Engine with Swirl Combustion Chamber
Piston Displacement (cc)			1794
Bore × Stroke (mm)			90 × 94
Connecting Rod Length (mm)			164
Max. Output (PS/rpm)			35/2600
Valve Timing	Intake 254°	I.V.O	22° BTDC
		I.V.C	52° ABDC
	Exhaust 254°	E.V.O	52° BBDC
		E.V.C	22° ATDC
Injection Time			23° BTDC

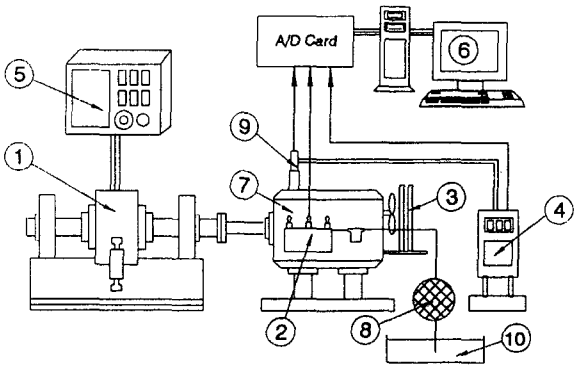


① Swirl Chamber ④ Piston
② Jet Passage ⑤ Nozzle
③ Main Chamber ⑥ Cylinder Head

Fig. 1 Shape of swirl combustion chamber

Table 2 Changed dimensions and shapes of combustion chamber for test engine

Jet passage area	L=12mm : 56.6mm² L=13.2mm : 62.8mm² L=14.6mm : 70.1mm²
Jet passage angle	25 deg., 30 deg.
Piston cavity shape	Rectangle Trapezoid
Piston cavity depth 	J=3.5mm, 5.0mm



① Dynamometer ⑥ Computer
② Injection Pump ⑦ Test Engine
③ Radiator ⑧ Fuel Flowmeter
④ Smoke Meter ⑨ Exhaust Temp. Gauge
⑤ Load and rpm Controller ⑩ Fuel Tank

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 실험방법

기관 성능에 주요한 영향을 미치는 연락공의 통로면적, 연락공의 경사각, 주연소실의 피스톤 상부 홈의 깊이 그리고 피스톤 상부 홈의 형상(사각형, 사다리꼴형) 등을 Table 2와 같이 설계하고 이들의 성능 특성을 해석하기 위하여, 기관의 회전수를 1400rpm, 2000rpm, 2600rpm으로 고정한 후, 각 회전수에서 전 부하 영역에 걸쳐 연료소비율, 그을음 농도 및 배기온도를 계측하였다. 계측시에는 각 모우드마다 안정된 운전 상태에 도달하여 5분이 경과한 후, 1분동안의 평균치를 계측값으로 하였다. 그리고, 분사시기에 따른 성능의 의존성을 배제하기 위하여 분사시기는 23° BTDC로 일정하게 유지하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연락공 통로면적에 따른 성능 특성

연락공의 통로면적은 와류실과 주연소실 속의

작동 유체의 운동에너지에 관계하면서, 통과하는 유체의 교축에 의한 열손실을 동반한다. 즉, 와류실 속에서 적절한 혼합기 형성 에너지를 보장하고 주연소실 속에서의 확산연소를 촉진하려면 연락공의 면적을 감소시켜야하나, 열효율 증대를 위해 연락공에서의 교축손실을 줄이고 연락공 표면부로의 열전달계수를 감소시키려면 이의 면적을 증대시켜야한다. 연락공 통로면적은 이러한 상반된 관계에서 최적치를 이끌어내어야 한다. 그리고 연락공을 통하는 유체의 유출입속도는 기관의 회전속도에 의존하므로, 기관의 운전방법에 대해서도 고려되어야 한다. 이에 따라 연락공 통로면적의 변화에 따른 기관의 최적 성능과 회전수 및 부하 변화에 따른 성능 특성을 파악하기 위하여, 연락공 통로면적만을 변경시켰을 경우의 성능 특성을 비교 분석하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 연락공 통로면적을 56.6㎟, 62.8㎟, 70.1㎟으로 변경하였을 경우의 성능 특성을 나타낸다. 연락공 통로면적 70.1㎟은 전보(前報)에서 논의한 바와 같이 연락공 통로면적이 증대할수록 연료소비율이 양호함을 확인한 후, 이의 면적을 더욱 넓혔을 때의 경향을 파악하기 위하여 설계 채택한 것이다.

Fig. 3은 저속인 1400rpm , 중속인 2000rpm 그리고 고속인 2600rpm에서 부하변동에 따른 각 연락공 통로면적들의 연료소비율을 나타낸다. 각각의 회전수에서 70~80% 부하에서 연료소비율이 가장 낮고 이 영역을 벗어나면 연료소비율이 증가함을 알 수 있다. 그리고 각 연락공 통로면적에 따른 연료소비율은 회전수와 부하에 따라 그 경향을 달리하고 있다. 즉, 중·저속인 경우는 연락공 통로면적이 최대인 70.1㎟에서 연료소비율이 각각 185g/PSh, 182g/PSh로 최소인 반면, 고속에서는 연료소비율이 195g/PSh로 가장 높다. 반면에, 중간 넓이에 해당하는 62.8㎟의 경우, 저속 저부하에서는 70.1㎟의 경우보다 연료소비율이 높았으나 고속회전에서는 연료소비율이 가장 낮은 190g/PSh를 나타내었다. 이러한 현상은 연락공을 통과하는 유체의 열손실과 와류실 및 주연소실에서의 연료의 혼합성이라는 관점에서 비교해 볼 때, 연료의 분사량이 적은 저속 저부하의 경우, 연료의 혼합성보다는 연락공을 통과할 때의 열손실이 상대적으로 크게 지배하는 반면, 분사량이 많은 고속 고부하의 경우 다량의 연료가 와류실에 분사되기 때문에 와류실에서의 혼합성 뿐만 아니라, 주연소실 속에서도 공기와 충분히 혼합하여야하므로 연락공에서의 유속증대가 강조되어야 한다. 따라서, 저속 저부하의 경우 연락공에서의 열 손실이 가장 적은 형인 70.1㎟의 경우가 연료소비율이 가장 낮으며, 고속 고부하에서는 이보다 유속 증대 효과가 큰 62.8㎟의 경우가 연료소비율이 가장 낮게 되는 것이라 판단된다. 그리고 이러한 결과로부터, 본 실험 기관의 경우 연락공 통로면적 증가에 따른 연료소비율 향상의 한계는 연락공면적 62.8㎟에서 70.1㎟으로 이행되는 어느 점에 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 조건에서 얻은 보쉬 그을음농도를 나타낸다. 회전수가 증가할수록 그을음농도는 낮아졌으며, 각 회전수에서 점선 이상의 고부하 영역으로 갈수록 그을음농도가 상승적으로 증가해 감을 알 수 있다. 그리고 연락공 통로면적 변화에 대한 경향은 1400rpm의 저속 고부하에서 62.8㎟의 경우가 비교적 높게 나타난 반면, 그 외의 영역에서는 통로면적 변화에 관계없이 대체로 유사한 경향을 보이고 있다.

3.2 피스톤 상부 홈의 깊이에 대한 영향

Fig. 5는 Fig. 3에서 행한 실험에서 피스톤 상부 홈의 깊이를 3.5㎜에서 2㎜ 더 깊은 5.0㎜로 한 경우의 실험 결과이다. 앞장에서 논의한 바와 같이 연락공 통로면적 70.1㎟을 피스톤 상부 홈의 깊이 3.5㎜에 적용했을 경우, 중·저속에서는 양호한 연료소비율을 나타냈으나 고속 영역에서는 다른 것에 비해 연료소비율이 오히려 증대함을 확인하였다, 이에 대해 피스톤 상부 홈의 깊이를 5.0mm로 한 결과, Fig.에서 알 수 있는 바와 같이 중·저속에서 연료소비율이 증대한 반면 고속에서 연료소비율은 오히려 양호하며, 최소치(187g/PSh)임을 알 수 있다. 그리고, 연락공 통로면적의 넓이가 중간에 해당하는 62.8㎟의 경우 중·고속에서 연료소비율이 증가한 반면 저속에서는 최소치 177g/PSh의 매우 양호한 결과를 얻었다.

이에 따라, 기관 성능은 연락공의 면적뿐만 아니라 미연가스가 와류실로부터 주연소실로 분출될

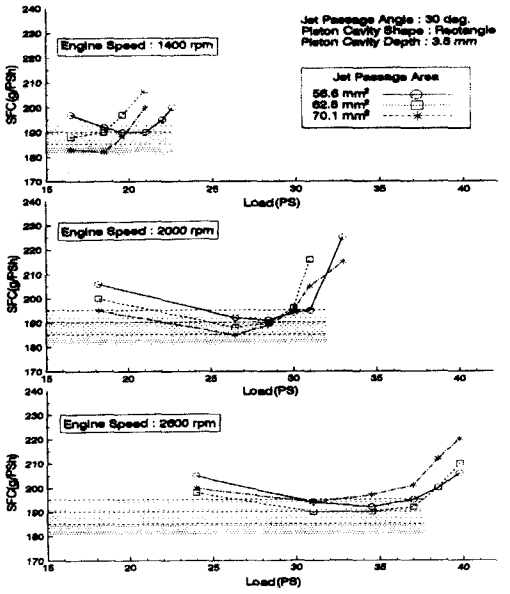


Fig. 3 Specific fuel consumption ratio on jet passage area in case of iet passage angle 30 deg., piston cavity shape rectangle, piston cacity depth 3.5 mm

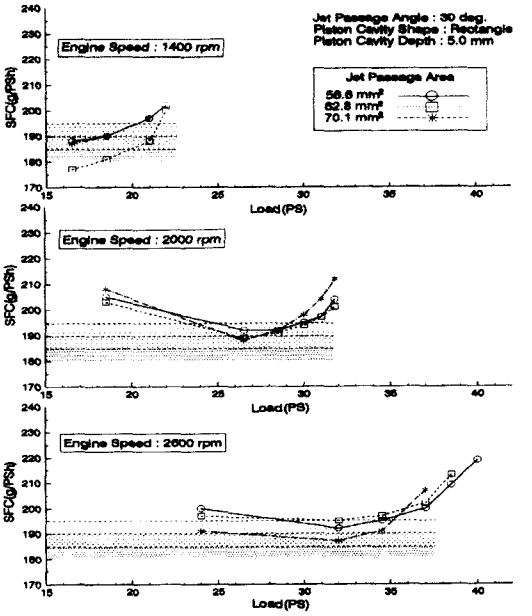


Fig. 5 Specific fuel consumption ratio on jet passage area in case of iet passage angle 30 deg., piston cavity shape rectangle, piston cacity depth 5.0 mm

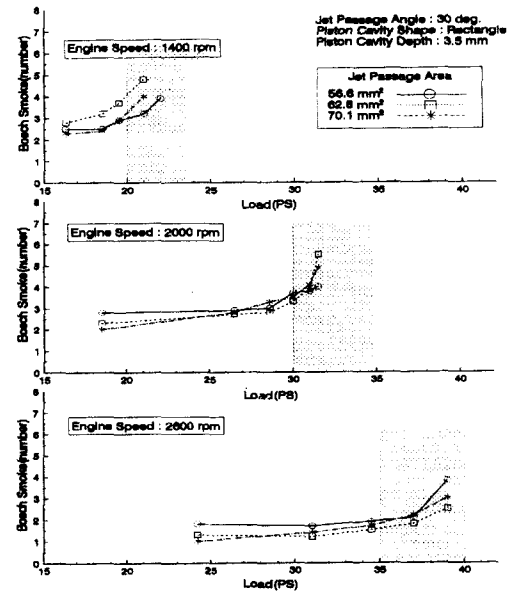


Fig. 4 Bosch smoke number on jet passage area in case of jet passage angle 30 deg., piston cavity shape rectangle, piston cavity depth 3.5mm

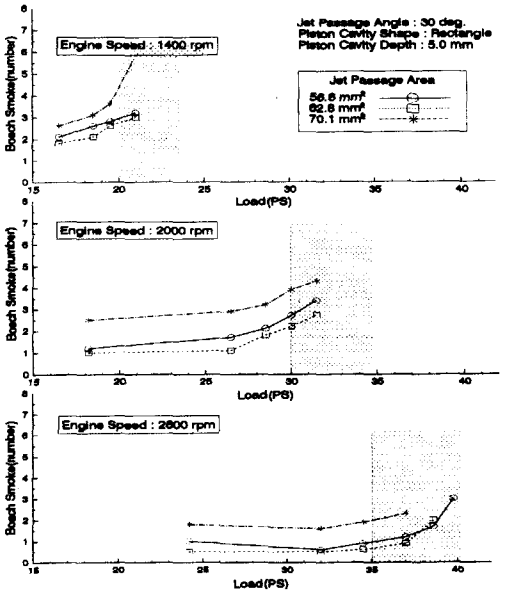


Fig. 6 Bosch smoke number on jet passage area in case of jet passage angle 30 deg., piston cavity shape rectangle, piston cavity depth 5.0 mm

때, 화염선단이 직접 닿는 피스톤 상부 홈의 깊이에 따라 크게 좌우된다는 것을 확인할 수 있다.

피스톤 홈의 깊이는 와류실 속의 미연가스가 연락공을 통과하여 주연소실로 분출되면서 피스톤 상부에 닿은 후, 주연소실의 외곽지역으로 퍼져나가는 분포 상황에 관여하며, 이러한 분포 상황은 분출하는 미연가스의 관통력에 최적인 홈의 깊이가 유지될 때 양호하게 되어, 주연소실에서의 확산 연소성을 향상시킨다고 판단된다. 즉, 연락공 면적이 70.1㎟의 경우 낮은 기관회전수에서는 연락공의 유출속도가 감소하여 관통력을 잃게 되므로, 피스톤 홈의 깊이가 깊으면 주연소실 외곽지역으로의 분포 상황이 나빠지는 반면, 고회전수에서는 주연소실로의 미연가스 유출속도 증가로 관통력이 증대하여 주연소실 외곽지역에서의 분포 상황을 양호하게 하기 때문에 이러한 결과가 나온 것이라 판단된다. 그리고, 연락공 통로면적 62.8㎟의 경우는 저회전수에서 최적의 관통력이 유지되는 반면, 중·고속으로 갈수록 과대 관통력이 발생하여 오히려 확산 연소성을 불량하게 하였기 때문으로 추측된다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이, 기관 성능은 피스톤 상부 홈의 깊이에 따라 적합한 연락공 통로면적을 선택하면 양호한 결과를 얻을 수 있으나, 전회전수 영역을 모두 만족하는 최적의 연락공 통로면적은 얻을 수 없다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5의 실험 조건인 경우의 그을음농도를 나타낸다. 연락공 통로면적이 70.1㎟인 경우가 저회전수 영역에서 상대적으로 높은 그을음농도를 나타내며, 고속에서는 저부하 영역에서 보쉬스모그 2 정도를 나타내었다.

한편, 그을음의 경우 피스톤이 최대출력점을 통과한 후 팽창행정 중기 이후의 후연소 결과에 크게 좌우되며, 피스톤 홈과 연관한 연소말기의 연소 해석은 본 실험 범위내에서는 추정곤란하며, 56.6㎟과 62.8㎟의 경우 고속에서 그을음의 농도가 대단히 낮은 것에 주목하고자 한다.

3.3 피스톤 상부 홈의 형상에 대한 영향

와류실에서 미연가스가 주연소실로 분출할 때 직접 닿는 피스톤 상부의 홈은 그 깊이 뿐만 아니라 형상이 성능에 중요한 인자이다. Fig. 7, Fig. 8은 연락공 통로면적 62.8㎟을 피스톤 상부 홈의 형상을 사각형에서 사다리꼴로 했을 때의 경우와 70.1㎟을 사다리꼴로 했을 경우의 실험 결과를 나타낸다.

연락공의 통로면적이 동일한 62.8㎟의 것을 사각형에서 사다리꼴로 변경하였을 경우, 중속인 2000rpm에서 양호한 연료소비율을 나타내었으며, 70~80%부하에서 185g/PSh미만의 값을 얻었다. 반면에 고속인 2600rpm에서는 사다리꼴 형이 사각형의 경우보다 높은 연료소비율을 나타내었다. 그리고, 연락공의 면적을 70.1㎟으로 확대한 것을 사다리꼴 형에 적용시켰을 경우, 중·고속에서 높은 연료소비율을 나타내었다.

연락공으로부터 분출된 미연가스가 피스톤 홈에 부딛힌 후 팽창해 갈 때, 피스톤 홈의 형상이 미연가스 분류(噴流)가 팽창해 가는 형상과 유사한 모형으로 이루어질 때, 주연소실에서의 분포 상태와 공기와의 혼합성이 양호해지는 것으로 추정된다. 따라서 연락공 통로면적 62.8㎟의 경우, 사다리꼴 형상의 피스톤 홈에 적용시킨 결과, 2000rpm 영역에서 분류의 형상과 피스톤 홈의 형상이 서로 일치하였기 때문에, 이와 같은 좋은 결과를 얻은 것이라 판단된다. 반면에, 이와는 다른 형상의 경우나, 분류의 유속이 느려지는 70.1㎟의 연락공 통로면적의 경우, 분류 유속의 형상과 피스톤 홈 형상의 불일치로 연료소비율이 증대하는 것이라 추정된다.

Fig. 8의 그을음농도의 경우, 중속인 2000rpm 영역에서 연료소비율이 가장 양호하였던 62.8㎟의 사다리꼴 형상이 가장 낮은 그을음농도를 나타내었다.

3.4 연락공 경사각을 변경하였을 경우

연락공의 경사각은 와류실 내 선회류의 강도를 결정해 주고, 주연소실로의 화염분출시 관통력에 영향을 주어 확산연소에 관여한다. 이에 대해, Fig. 9는 연락공 통로면적을 62.8㎟으로 일정히 한 상태에서 연락공 경사각을 30° 에서 25° 로 변경했을 경우, 피스톤 홈의 형상과 홈의 깊이에 따른 연료소비율을 나타낸다.

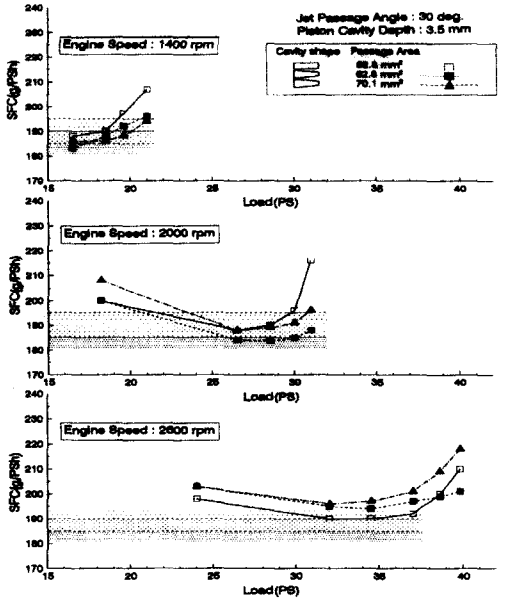


Fig. 7 Specific fuel consumption ratio on piston cavity shape and jet passage area in case of iet passage angle 30 deg., piston cavity depth 3.5 mm

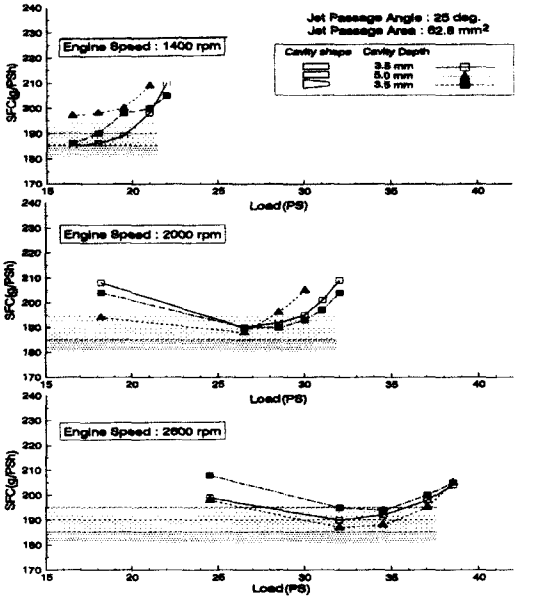


Fig. 9 Specific fuel consumption ratio on piston cavity shape and cavity depth in case of iet passage angle 25 deg., jet passage area 62.8 ㎟

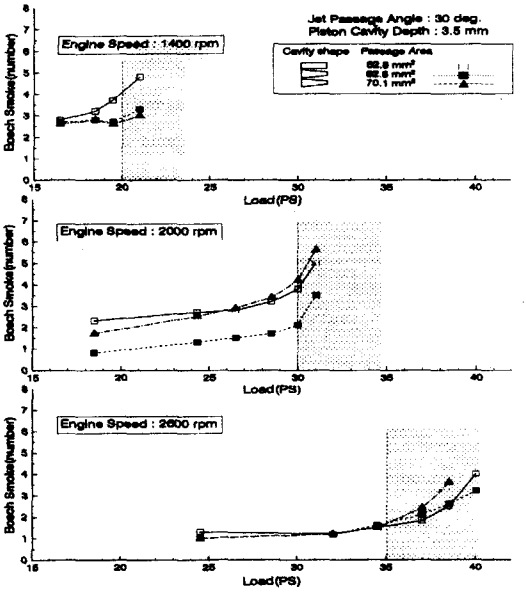


Fig. 8 Bosch smoke number on piston cavity shape and jet passage area in case of iet passage angle 30 deg., piston cavity depth 3.5 mm

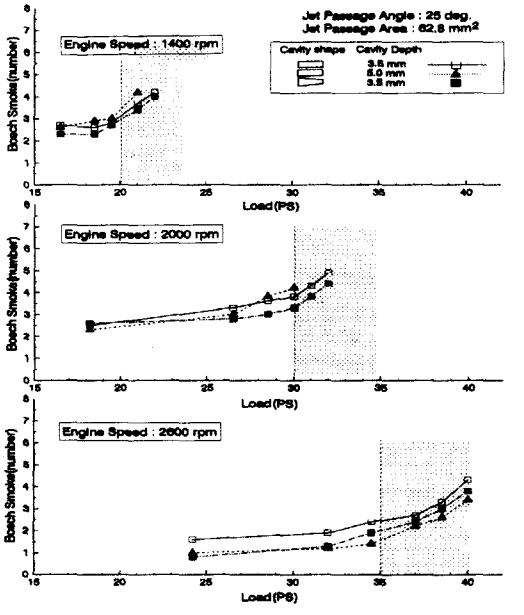


Fig. 10 Bosch smoke number on piston cavity shape and cavity depth in case of iet passage angle 25 deg., jet passage area 62.8 ㎟

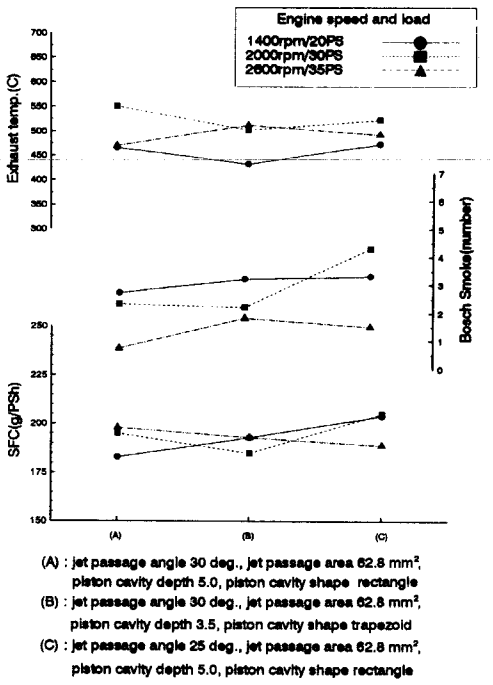


Fig. 11 Performance characteristics of combustion chamber that estimated min. SFC at each engine speed

고속인 2600rpm에서 피스톤 홈의 형상이 사각형이고, 홈의 깊이가 5.0㎜인 경우가 70~80% 부하에서 190g/PSh미만의 가장 양호한 연료소비율을 나타내었다. 그러나 중속인 2000rpm에서, 고부하 영역으로 갈수록 연료소비율이 급상승하는 경향을 보여주고 있으며, 공회전인 1400rpm에서는 대단히 불량하다. 이러한 결과를 이와 동일한 조건에서 연락공 경사각을 30° 로 한 경우 (Fig. 5의 62.8㎟의 그래프)와 비교해 보면 서로 상반된 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 동일한 조건에서, 연락공의 경사각을 감소시키면 고속 영역에서 성능특성이 양호해 진다는 것을 의미하며, 연락공 경사각이 감소함에 따라 피스톤 압축행정의 와류실 유입 선회류 강도를 증대시키는 효과와 팽창행정 시 연락공 분출 관통력을 최대로 하는 효과가 고속회전에서 두드러진 반면, 저속에서는 오히려 둔화되는 현상 때문으로 판단된다. 그러나, 피스톤 홈의 형상을 달리했을 경우, 이러한 추측에 따르지 않는 것에 대해서는 정확한 해석을 위해 보다 직접적인 방법으로의 접근이 있어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 10은 상기 연료소비율에 대응하는 그을음농도를 나타낸다. 각 회전수의 고부하 영역에서 비교적 높은 그을음농도를 나타냈으며, 연료소비율이 양호한 조건에서 각기 양호한 결과를 나타내었다.

3.5 기관용도에 따른 연소실 형상의 선택

이상의 각 조건들에서 얻은 실험 결과로부터, 연락공의 통로면적, 피스톤 홈의 깊이와 형상 및 연락공의 경사각에 대해 그 성능 특성을 비교 분석한 결과, 모든 회전수 및 전 부하 영역에서 양호한 연료소비율을 갖는 연소실 형상은 얻을 수 없었다. 이는 각각의 형상이 서로 상반된 영향을 미치는 물리적 특성상 당연한 결과이다. 그러나 각 회전수에 대해 최량의 연료소비율을 갖는 연소실 형상을 찾아낸다면, 기관의 특정 운전영역에서 요구하는 적절한 연소실 형상을 채택할 수 있으리라 사료된다.

Fig. 11은 주어진 회전수에서 최소의 연료소비율을 나타내는 연소실 형상을 선택한 것으로서. 1400rpm(20PS), 2000rpm(30PS), 2600rpm(35PS)의 운전 조건하의 연료소비율과 그을음농도 및 배기온도를 함께 나타내었다. A의 경우, 연락공 경사각 30° , 연락공 통로면적 62.8㎟, 피스톤 홈 깊이 5.0, 피스톤 상부 홈이 사각형인 연소실 형상으로, 저속에서 가장 양호한 연료소비율을 나타내는 연소실이다. 이 연소실은 고속에서 그을음농도가 최저이며, 배기온도는 2000rpm에서 550℃까지 상승하였다. 그리고 B의 경우, 연락공 경사각 30° , 연락공 통로면적 62.8㎟, 피스톤 홈의 깊이 3.5㎜, 사다리꼴의 피스톤 홈인 연소실 형상으로 중속인 2000rpm에서 가장 양호한 연료소비율을 나타내는 연소실이다. 이는 2000rpm 영역에서 우수한 연료소비율 특성을 나타내면서 그을음농도 및 배기온도가 비교적 양호하므로, 발전기관과 같이 주어진 주파수 운전 회전수에서 최적의 열효율을 갖도록 해야하는 정속기관에 적용한다면, 1800rpm의 소형 발전기에 적합한 연소실 형상이라 판단된다. C의 경우는 연락공 경사각 25° , 연락공 면적 62.8㎟, 피스톤 홈의 깊이 5.0㎜, 사각형의 피스톤 홈인 연소실 형상으로 고속인 2600rpm의 고부하에서 가장 양호한 연료소비율을 나타내는 연소실이다. 따라서

이런 형은 중속에서 그을음농도가 높은 단점이 있으나 이에 대한 보완과 개선이 이루어진다면 고속 고출력을 요하는 소형 선박에 추천할 수 있는 연소실 형상이라 사료된다.

4. 결 론

와류실식 디젤기관 연소실의 연락공 통로면적을 70.1㎟까지 증대시키고, 분사시기를 일정하게 한 후, 피스톤 상부 홈의 형상 및 깊이 그리고 연락공 경사각에 대한 성능특성을 비교 분석한 결과 다음과 같이 요약되었다.

1) 연락공 통로면적 변화에 대한 연료소비율은 기관 회전수와 부하에 따라 그 경향을 달리 했으며, 피스톤 상부 홈의 깊이에 연계되어 있음을 확인하였다.
2.) 와류실식 연소실 설계 시 주목되는 연락공 통로면적, 피스톤 홈의 깊이와 형상 및 연락공 경사각 등의 최적치는 기관의 각 회전수와 부하에 따라 결정되며, 기관의 운전영역에 따라 최량의 연료소비율을 갖는 연소실 형상을 선택할 수 있었다.
3) 그을음 배출은 각 설계인자들의 정격출력 이하인 저부하 영역에서 저농도의 양호한 결과를 얻었으나, 연료소비율과 동일한 경향을 나타내지는 않았다.

참고문헌

1) 라진홍, 안수길, "와류실식 소형디젤기관의 연소실형상이 기관성능에 미치는 영향(Ⅰ)", 한국동력기계학회, 제2권 2호, 1998
2) 大道寺 達, "The Combustion Chamber Design of Diesel Engine in Theory and Practice", 山海堂, pp.37~61
3) Tateishi, Mataji, et al., "New Combustion System of IDI Diesel Engine", SAE 841081, 1984
4) Tamura, H. M. Hashimoto, and M. Maekawa, "New Combustion System of IDI Diesel Engine for Passenger Car Application", SAE 890262, 1989
5) 井元浩二, 外 4人, "副室式ディーゼル機關の低公害システムの研究", 日本機械學會文集(B編), 61卷 585號, 1995
6) Strauss, T. S. and G. W. Schweimer, "Combustion in a Swirl Chamber Diesel Engine Simulation by Computation of Fluid Dynamics", SAE 950280, 1995