

리엔트런트형 연소실 형상이 디젤기관의 연소특성에 미치는 영향 -연소실 형상비(Bowl직경/Bowl깊이)의 효과-

Effect of Reentrant Type Bowl Geometry on Combustion Characteristics in Diesel Engine -Effect of Aspect Ratio(Bowl Diameter/Bowl Depth)-

권준박*, 김형섭**, 권순익***, 오재건***
J. B. Kwon, H. S. Kim, I. K. Kwon, K. J. Oh

Abstracts

Effect of reentrant type bowl geometry on combustion characteristics was investigated in a D.I.diesel engine. The main factor was the aspect ratio (Bowl Diameter/Bowl Depth) of bowl of combustion chamber, and the measured data include the cylinder pressure, engine performance and emissions of the engine using the 4 kinds of the combustion chamber. Experimental results indicate that the effect of dc/H and nozzle protrusion are relatively small and there exists an optimum dc/H according to the combustion conditions.

It is also found that the smoke emission is quite sensitive the overall combustion time where the 90 percentage of the combustion heat is released. The smoke emission increases by shortening the 90% combustion time while it decreases by delaying the 90% combustion time.

Key words : Reentrant type bowl(리엔트런트형 연소실), D. I. diesel engine(직접분사식 디젤기관), Nozzle Protrusion(노즐돌출량), Bowl Diameter/Bowl Depth(dc/H , 연소실 형상비), Bowl Geometry(연소실 형상), Combustion characteristics(연소특성)

1. 서론

직접분사식 디젤기관의 연소에 영향을 미치는 주요 인자로는 연료의 분사방법, 공기유동의 강도, 그리고 연소실 형상 등을 들 수 있다. 이 3가지가 모두 잘 조화되어 충분히 연료와 공기의 혼합이 행해짐에 따라 비로소 양호한 연소가 이루어진다.

이러한 디젤기관의 연소에 미치는 3인자 중에서 연소실은 연료와 공기를 혼합시켜 주는 장소로서 그 혼합의 정도가 연소상태 및 배기 배출물 특성과 관련되어지므로 그 형상은 기관 출력 및 연소특성에 큰 영향을 미치는 주요인자이다.

직접분사식 디젤기관에 사용되어지는 연소실의 형태로는 접시형, 볼록형, 반구형, 중앙돌기

* 아주대학교 기계공학과 대학원

** 아주대학교 기계공학과

*** 두원공업 전문대학

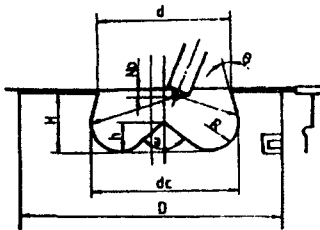
부가 있는 접시형 등 여러 가지가 있으나, 최근에는 연소실 bowl의 상부와 하부의 직경이 같은 토로이달(toroidal)식과 하부직경이 더 큰 리엔트런트(reentrant)식이 주로 사용되고 있다. 토로이달식은 연소실내 공기유동이 적어 고압 분사에 유리한 반면, 리엔트런트식은 공기유동이 상대적으로 크고 연소기간 후반까지 지속되어 분사시기에 둔감하다는 장점이 보고되고 있으나, 대부분의 기관 메이커(Engine maker)에서는 최적의 연소상태를 만들어주기 위해 이들 연소실을 조금씩 개량한 그들 나름대로 독특한 연소실 형상을 고안하여 실제기관에 적용하고 있다^{(1),(2),(3)}. 그러나, 연소실 형상비 등의 정성적인 면이 분무와 공기유동에 미치는 영향에 대해서는 그다지 알려져 있지 않다.

이에 본 연구에서는 리엔트런트식 연소실의 형상변화가 연소에 미치는 영향을 파악하기 위하여 연소실의 직경과 깊이의 비(d_c/H) 즉, 연소실 형상비와 노즐 돌출길이 등을 변경하여 연소실의 형상비가 기관의 운전조건에 따른 연소 특성에 미치는 효과를 파악하였다.

2. 연소실

2.1 연소실 설계인자

디젤기관의 연소실 설계시 고려되는 주요 인자들에 대한 정의를 Fig. 1에 나타내었다.



- D : Piston Diameter
- H : Bowl Depth
- d_c : Bowl Lower Diameter
- d : Bowl Upper Diameter
- R : Bowl Lower Radius

- θ : Reentrant Angle
- N_p : Nozzle Protrusion
- h : Cupola Height of Bowl Center
- a : Cupola Angle of Bowl Center
- V_b : Combustion Volume
- V_c : Compression Volume

Fig. 1 Definition of Bowl Geometry

2.2 각 인자가 공기유동에 미치는 효과

연소실에 관한 각종 설계인자의 설정은 설계자에 따라 약간씩 정의가 다르나, 각종 설계인자를 변경시킬 때 각 인자가 공기유동에 미치는 효과를 Table 1과 같이 예상할 수 있다.

Table 1 Effects of Design Parameter on Air Motion in Combustion Bowl

Air Motion Parameter	Swirl	Squish	Turbulence	Air Availability	Remarks
d_c/H			⊙		Aspect Ratio
d/d_c	⊙	⊙			Reentrant Ratio
d_c/D	⊙				
θ	⊙	⊙			Reentrant Angle
V_b/V_c				⊙	k-factor (5)

(⊙ : 영향을 미침)

2.3 변경인자

본 실험에 이용된 4종의 연소실은 압축비를 17.7 ± 0.2 로, 각 연소실의 용적비(연소실체적/전체 간극체적)는 약 72%로 동일하게 한 상태에서 bowl의 하부직경(d_c)과 깊이(H)를 변경시켰다. 이 경우, d_c/H 의 비가 클수록 bowl의 형상은 깊이가 얇은 shallow type으로 변화한다. 상세 변경인자를 Table 2에, 또 변경된 각 연소실 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

Table 2 Test Parameters

Item		Parameters & Conditions			
Bowl	Type	d _c	H	d _c /H	d _c /D
	A	52.0mm	21.0mm	2.50mm	0.500
	B	52.0mm	19.1mm	2.70	0.500
	C	54.5mm	19.1mm	2.85	0.524
D	58.5mm	18.5mm	3.15	0.563	
Nozzle	Diameter	0.26, 0.27, 0.28, 0.285, 0.30 mm			
	Hole Number	5 holes			
	Protrusion	2.5, 3.5, 4.5 mm			
Engine Revolution	1400, 2200, 3400 rpm				



Fig. 2 Comparison of Bowl Geometry for Different Aspect Ratio(d_c/H)

3. 실험장치 및 방법

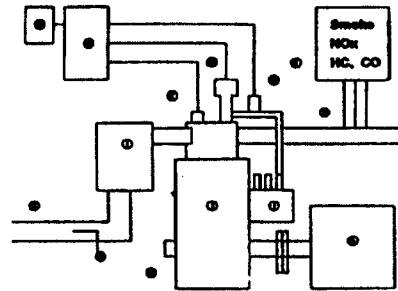
실험에 사용된 기관은 직경 104mm, 행정 105mm의 단기통 직접 분사식 디젤기관으로 행정체적은 0.892 l로, 그 주요채원은 Table 3 과 같으며, 실험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다.

Table 3. Specification of Test Engine

Item	Specification	
Bore×Stroke	104×105mm	
Number of Cylinder	1	
Swept Volume	0.892 l	
Valve Timing	I.V.O	17 BTDC
	I.V.C	47 ABDC
	E.V.O	53 BBDC
	E.V.C	11 ATDC
Injection Pump	Λ - Type	
Plunger Diameter	9.5mm	
Nozzle Opening Pressure	21.6 MPa	

실험은 냉각수 및 오일온도를 80±2℃, 흡기압

-350mmHg / 3400rpm, 배기압 150mmHg / 3400rpm의 조건으로 기관 회전수를 1400, 2200, 3400rpm하에서 연소실을 변경시켜 부분 부하 및 전부하 상태의 기관성능, 배출가스 및 연소특성을 측정하였다. 연소압력 측정은 피에조 압력변환기(AVL, QC32C-E)를 그 끝단이 연소실의 bowl 가장자리에 오도록 설치하여 그 출력신호를 연소해석장치(AVL, D/A 657)에 보내어 기록 및 열발생율을 계산하였으며 연소압력 데이터는 80사이클의 평균치로 나타내었다.



- ① Oculoscope ② Combustion Analyzer
- ③ Cylinder Pressure Transducer ④ Needle Lift Sensor
- ⑤ Fuel Pressure Transducer ⑥ Gas Analyzer
- ⑦ Exhaust Pipe ⑧ Dynamometer ⑨ Injection Pump
- ⑩ Engine ⑪ Rotary Encoder ⑫ Surge Tank
- ⑬ Air Flow Meter ⑭ Inlet Pipe

Fig. 3 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

또한 착화 지연 기간은 열발생율이 “-”에서 0이 되는 시점을 착화점으로 보고 노즐에서 연료가 분사되는 시점으로부터 착화점까지로 정의하여 측정하였다.

연료관내의 압력은 노즐 입구 측에 피에조식 압력변환기 (AVL, 5QP6002)를 설치하여 측정하였으며 연료의 분사시기 및 분사기간은 노즐의 니들밸브 상부에 전자식 봉을 연결하여 유도전류의 변화로부터 측정하였다. 또 흡기압력은 흡기포트 앞쪽에 설치된 서지탱크에서, 배기압력은 배기포트 후방 15cm 위치에서 측정하였으며 흡입공기량은 서지탱크 입구에 설치된 공기유량계로서 측정하였다.

배기 배출물은 배기포트로부터 2.5cm후방에 샘플링 프로브를 삽입하여 가스를 추출한 후 분석하였다. NO_x분석에는 화학 발광식 NO_x측

정기(Horiba제, CLA-53)를, CO분석에는 비분산형 적외분석식 CO측정기(Horiba제 AIA-23A, S)를, THC분석에는 수소염 이온화 검출식 THC측정기(Horiba MZX-1120 TF1-H)를, Smoke측정은 Bosch식 Smoke Meter(Zexel 제)를 이용하였다.

4. 실험결과 및 검토

4.1 연소실 형상비(dc/H)의 영향

연소실 형상비의 변경에 따른 연소실의 표면적, 리엔트먼트비(d/dc) 및 압축비의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 형상비 변경에 따른 리엔트먼트비는 약 0.94로 거의 동일하게 하였으며, 표면적은 최대 30%의 차이를 가지고 있다. 또한 압축비는 17.7 ± 0.2 로 0.4의 차가 존재한다. 연소실 형상비가 커질수록 shallow bowl dish type에 가깝고, 형상비가 작을수록 deep bowl dish type에 가깝다.

Fig. 5는 기관회전수 2200rpm 때의 전부하상태에서의 연소실 형상비 변화에 따른 기관성능과 연소특성을 나타낸다. 형상비 증가에 따라

연료소비율은 약간 저하하는 경향을 나타내며, 매연농도는 형상비가 2.7일 때 가장 악화하고 그 이후로는 점차 좋아지고 있다. 착화지연기간은 형상비와 관계없이 거의 비슷한 값을 나타내고 있으나 Fig. 4에서의 압축비 변화와는 반비례하고 있다. 또한 연소실 최고압력은 압축비가 가장 높고 연소실 표면적이 가장 작은 형상비 2.7일 때에 가장 높으며, 이 때문에 연소실 최고온도도 높게 나타나고 있다. 이는 높은 압축비에 의해 형성된 가스온도가 연소실 표면에 따른 열손실이 상대적으로 적어 압축압력이 높아진 것으로 생각할 수 있다. 또 공기과잉률의 증가는 출력향상에 따른 연료소비율이 저감되는 양상을 가져왔다.

열발생율이 90%가 되는 점을 살펴보면 형상비 2.5가 25.5 ATDC로 가장 늦고, 형상비 2.7이 22.5 ATDC로 가장 빠르다. 이는 열발생이 그만큼 빨리 끝남을 나타내며, 이로 인해 매연농도가 가장 악화되어 열발생이 끝나는 시기는 매연 농도와 관계 있음을 알 수 있다.

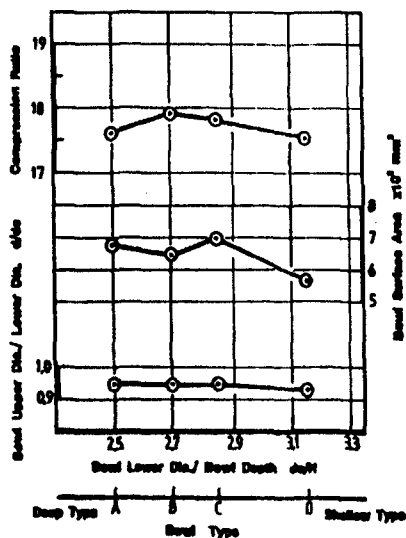


Fig. 4 Comparison of each bowl specification

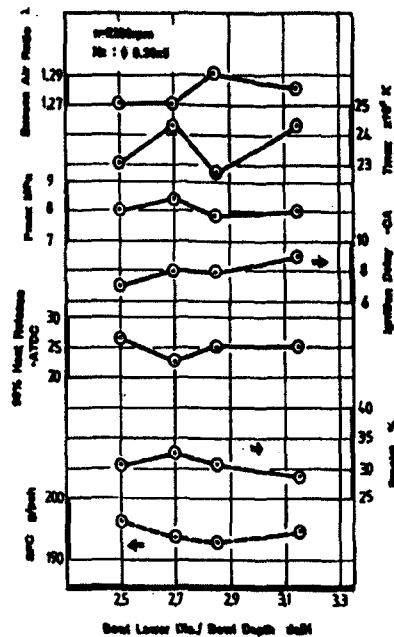


Fig. 5 Combustion characteristics of each bowl at 2200rpm

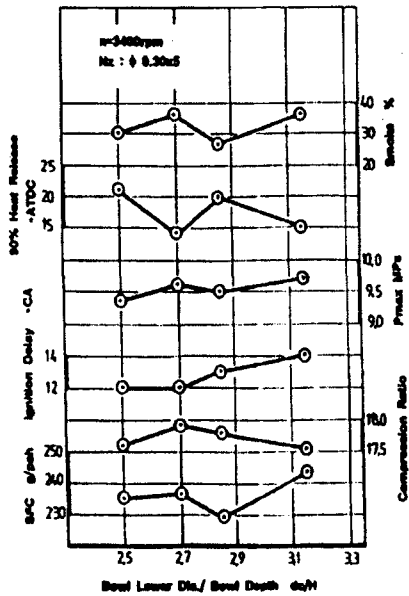


Fig. 6 Combustion Characteristics of Each Bowl at 3400rpm

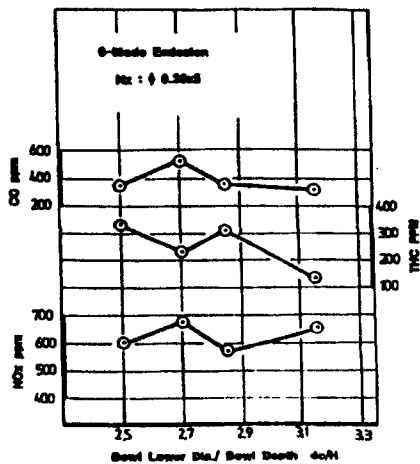


Fig. 7 6-Mode Emission of Each Bowl at 2200rpm

3400rpm의 전부하 상태에서의 연소실 형상비 변경에 따른 기관성능을 Fig. (6)에 나타낸다. 형상비 변화에 따른 착화지연기간은 최대 2°C A의 차이를 보이고 있으나, 절대기간으로는 3400rpm을 고려하면 0.1ms로 형상비 변화에

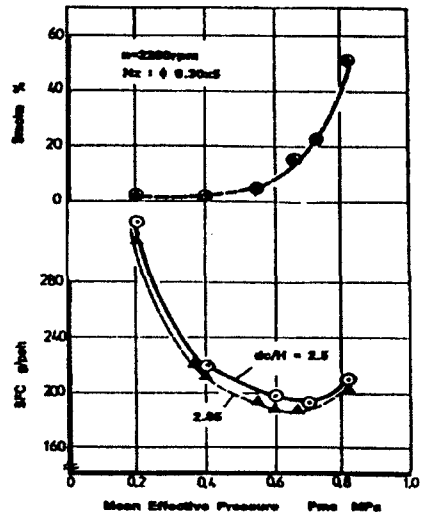


Fig. 8 Comparison of Partial Load Performance on $d_L/H=2.5$ and 2.85

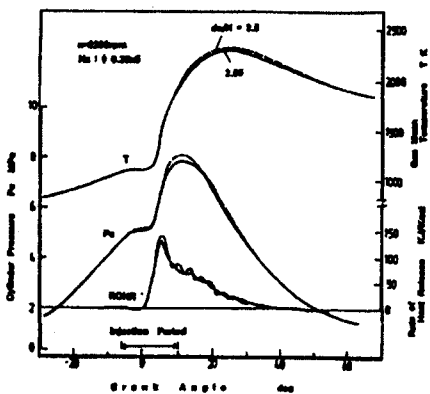


Fig. 9 Comparison of Combustion Characteristics on $d_L/H=2.5$ and 2.85

따른 착화지연기간은 거의 변화가 없는 것으로 생각할 수 있다. 또한 연료 소비율은 2200rpm과 마찬가지로 형상비가 2.85일 때 가장 좋으며, 매연농도도 가장 낮음을 알 수 있다. 열발생율이 90%가 되는 점을 살펴보면 형상비 2.7과 3.15일 때가 가장 빠르며, 이때의 매연농도는 상대적으로 악화된 것을 알 수 있어 열발생이 끝나는 시점과 매연농도가 관계 있음을 나타내고 있다. 그러나 형상비의 변화에 따른 성

능변화는 일정한 경향을 보이지 않고 있으나, 형상비를 크게 할수록 최고 압력이 상승하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 7은 6-모드 에미션(Emission)의 결과를 나타낸 것이다. CO는 형상비 2.7일 때 약간 높으며, 그 외는 거의 동등한 값을 나타내고 있으며, THC는 형상비 증가와 함께 감소하는 경향을 나타내고 있다. NO_x는 연소가스의 온도와 그 온도의 체류시간과 관련이 있으며 연소가스의 평균 최고온도가 높은 형상비 2.7과 3.15에서 많이 발생하고 있다. 이상의 시험결과로부터 연소실 형상비 2.5와 2.85가 연비와 에미션측면에서 다른 연소실에 비해 상대적으로 좋음을 알 수 있다.

2200rpm의 부분부하 상태에서의 연소실 형상비 2.5와 2.85를 연료소비율과 매연농도 측면에서 서로 비교한 것을 Fig. 8에 나타낸다. 부분부하 상태에서의 매연농도는 거의 동일하나, 연료소비율은 형상비 2.85가 우수함을 알 수 있다.

또한 Fig. 9의 연소특성 곡선에서도 알 수 있는 바와 같이 실린더내의 최고온도를 보면 형상비 2.85가 2.5보다 낮아 상대적으로 NO_x의 저감을 예상할 수 있으며, 실제로 Fig. 7의 6-모드에서도 저하된 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 연소실 형상비가 각각 다른 4종류의 연소실에서 형상비 2.85가 가장 좋은 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

4.2 노즐분공경의 선정

연소실 형상비 2.85를 이용하여 노즐의 분공경을 변화시켜 측정된 성능값의 결과를 Fig. 10에 나타낸다. 분공경을 크게 함에 따라 연료소비율은 좋아지나 매연농도는 점차 증가한 후 다시 감소하고 있다. 노즐의 분공경을 크게 하면 Fig. 11의 연소특성 곡선에서 알 수 있는 바와 같이 분사시간을 단축시키는 요인의 하나가 된다.

4.3 노즐돌출량의 선정

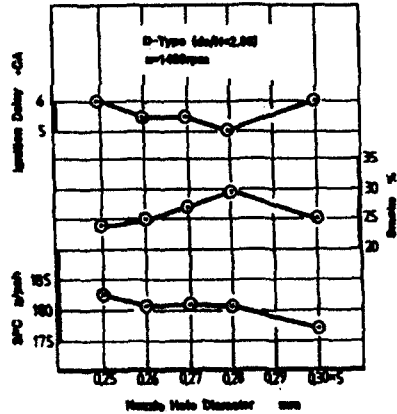


Fig. 10 Comparison of Combustion Characteristics of Each Nozzle

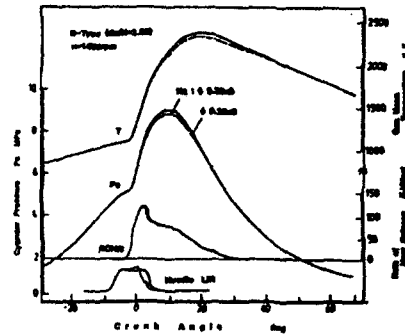


Fig. 11 Comparison of Combustion Characteristics of Nozzle Diameter 0.30 and 0.25 on D-Type Bowl

분공경저감에 따라 매연농도가 좋아진 것은, 일반적으로 분사시간이 길어지면 확산연소량이 증가하여 매연이 악화하는 경향이 있으나 분사압 증대에 의한 분무입경의 미소화, 분무관통력의 적정화 등의 연소개선의 효과가 확산연소량 증가에 의한 매연악화를 상쇄시켜 분사압증대의 효과가 더욱 크게 작용한 것⁽⁶⁾으로 생각할 수 있다.

연소실 형상비 2.85와 노즐의 분공경 0.30mm를 이용하여 노즐의 돌출량을 2.5, 3.5, 4.5mm로 변화시켰을 때의 성능을 Fig. 12에 나타낸다.

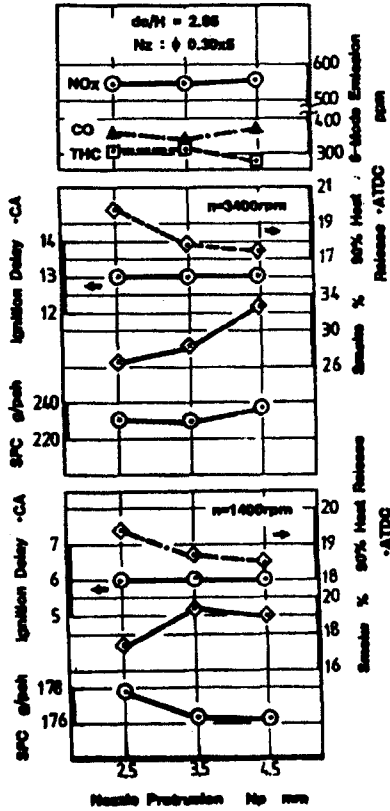


Fig. 12 Effect of Nozzle Protrusion at D-Type Bowl Shape ($d_c/H=2.85$)

착화지연기간은 저속, 고속 모두 노즐출출량과 무관하며, 연료소비율은 저속에서는 출출량 3.5mm와 4.5mm가 고속에서는 2.5mm, 3.5mm가 우수하다. 또한 매연농도는 저,고속 모두 노즐출출량이 작은 2.5mm가 가장 좋음을 알 수 있으며, 열발생량 90%시점은 출출량이 클수록 빨라지고 있다.

또, 6-모드 에미션값은 CO, THC, NO_x 모두 비슷한 수준을 나타내고 있다. 이는 Fig. 13의 노즐출출량 2.5mm와 3.5mm의 연소특성곡선에서 보는 바와 같이 실린더내 연소가스의 온도가 거의 동일하여 NO_x값의 차가 없음을 알 수 있다.

이상의 각 노즐출출량의 성능을 비교한 결과, 2.5mm가 가장 우수함을 알 수 있으며, 또한 열발생량 90%시점과 매연농도의 관계가

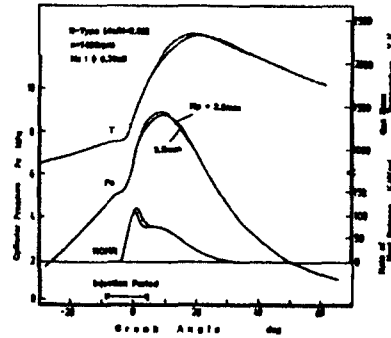


Fig. 13 Comparison of Combustion Characteristics of Nozzle Protrusion 2.5, 3.5 and 4.5mm

Fig. 5와 Fig. 6에서와 마찬가지로 서로 반비례함을 나타내고 있다.

5. 고찰

5.1 연소실형상비와 연소특성의 관계

연소실 bowl의 하부 직경과 깊이의 비(d_c/H), 즉 연소실 형상비를 변경시킬 경우의 각종 성능 및 연소특성을 Fig. 14에 나타낸다. 형상비 변경에 따른 착화지연기간은 거의 변화가 없으며 이는 착화지연기간이 연소실의 온도와 압력 그리고 벽면충돌의 유무에 영향을 받으나⁽⁷⁾ 형상비의 변경에 따른 압축비의 차가 적은 것으로 보아 연소실 내에서의 착화조건이 거의 변화가 없는 것으로 판단된다. 그러나 착화 이후의 연소강도가 변화함에 따라 전체적인 출력과 배기배출물에 영향을 미치고 있다.

일반적으로는 연소실 형상비(d_c/H)와 연소실 개구비(開口比, d_c/D)가 작을수록 상사점간극(top clearance)부의 공기가 bowl내로 흐르는 스퀴시(squish)가 커진다. 그러나 회전속도가 상승하면 스퀴시류의 감쇄율이 크게 되어 동일 스윙(swirl)비에서는 스윙의 원심력이 커서 스퀴시의 효과를 방해하는 것으로 생각할 수 있으며⁽⁸⁾, 이 때문에 연소실 형상비와 스윙비의 최적치가 존재한다고 생각된다. 전체적으로 살

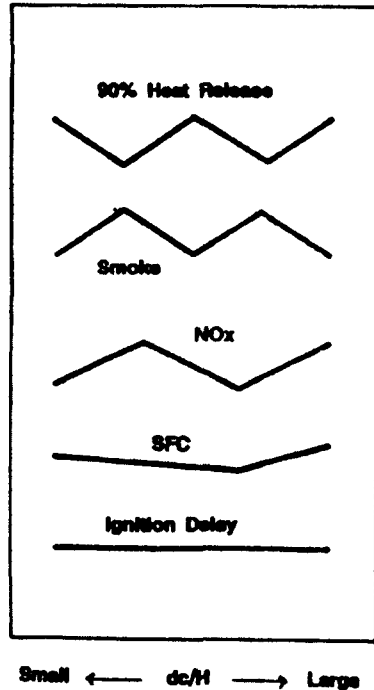


Fig. 14 Effect of dc/H on Combustion Characteristics

퍼보면 연소실 형상비 변화에 따른 성능 및 연소특성에 어느 일정한 경향은 보이지 않으나 본 실험조건에서는 연소실 형상비가 2.85, 노즐의 분공경 0.30mm, 노즐돌출량 2.5mm가 최적인 것으로 나타나고 있다. 또한 연소실 형상비와 개구비를 크게 할수록 연소실내에 분포되는 연료비율이 증가하기 때문에⁽¹⁾ Fig. 6에서의 결과처럼 최고압력이 상승하는 경향을 나타내고 있다.

5.2 매연농도와 열발생량 90%시점과의 관계

연소실 형상비 변경에 따른 매연농도는 어떤 특정한 경향을 나타내고 있지는 않으나 열발생이 거의 끝나는 90% 열발생시점과 매연농도와의 관계를 살펴보면 Fig. 5, 6, 12에서 나타낸 것과 같이 서로 반비례의 관계가 있음을 알 수 있다. 즉 인자변화의 조건에 관계없이 열발생

량 90% 시점이 빠르면 매연농도는 악화되고, 90% 시점이 늦어지면 매연은 좋아지고 있다. 이는 연소중·후반기의 확산연소기간과 관계가 있는 것으로 ATDC 20도 부근에서 생성이 끝나는 NOx와 달리 연소초·중기에 생성된 다량의 매연이 연소후기가 되어 화염 내에 공기가 도입됨으로서 계속해서 연소함으로써 매연농도가 저감되어, 열발생이 끝나는 시점이 늦어질수록 매연입자가 연소하는 기간이 그만큼 길어지는 것으로 생각할 수 있다.

6. 결론

연소실 형상비를 변화시켜 기관성능 및 연소특성을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연소실 형상비(dc/H) 및 노즐돌출길이의 변경은 착화지연기간의 길이에는 거의 영향을 미치지 않는다.
- 2) 변경인자에 관계없이 열발생량의 90% 되는 시점은 매연농도와 반비례관계로 이 시점이 빠르면 매연농도는 악화하고, 지연되면 매연은 저감된다.
- 3) 연소실 형상비변화에 따른 성능은 일정한 경향을 보이지 않고 각 연소조건에 따라 최적치가 존재한다.

참고 문헌

- (1) N. Yanangisawa and T. Takatsuki, "Combustion Chamber for D.I. Diesel Engine", Internal Combustion Engine, Vol.26, No.338, pp.63-68, 1987
- (2) F. Schweinzer, "Valve Controlled Compression Ignition Engine", U.S Patent No.4779587, 1988
- (3) K. Mori, H. Kamikubo, T. Kawatani, I. Fukano and K. Sugahara, "Technology for Exhaust Emission Reduction on Heavy Duty Diesel Engine", Mitsubishi Motor Company

Technical Review, No.4, pp.24-34, 1992

(4) 권순익, "리엔트런트 연소실형상이 디젤기관 연소특성에 미치는 영향 · 리엔트런트 각도 및 중앙돌기부 높이의 영향". 한국자동차공학회 논문집, 제3권, 제3호, pp.37-45, 1995

(5) S. Ishida, R. Kigara and M. Furubayashi, "Development Status of a Small Direct Injection Engine at Isuzu", SAE 850068, 1985

(6) 권순익, 김완, "디젤기관의 인소에 미치는 분사계의 영향", 한국자동차공학회지, Vol.15, No.1, pp.37-44, 1993

(7) S. I. Kwon, "An Experimental Study on

Ignition Delay of Diesel Spray", A Thesis for a Doctorate of University of Hiroshima, 1990

(8) T. Kitamura and S. Matsuoka, "Development of Slanting Wall - Impingement Type Carpet-Roll Combustion System of DI Diesel Engine", Transactions of SAE of JAPAN, Vol.22, No.1, pp.33-37, 1991

(9) 池上 洵, "直接式噴射機関における燃焼(下)", 内燃機関燃焼, 山海堂, pp.270-276, 1973

(10) 권준박, 권순익, 김형섭, "Effect of Swirl Chamber Shape on Combustion in Diesel Engine", Journal of the M.E.S.J, Vol.30, No.6, 1995