

〈논 문〉 SAE NO. 953734

리엔트런트형 연소실 형상이 디젤기관의 연소특성에 미치는 영향 - 리엔트런트 각도 및 중앙돌기부 높이의 효과 -

Effect of Reentrant Type Bowl Geometry on Combustion Characteristics in Diesel Engine

Effect of Reentrant Angle and Cupola Height of Bowl Center

권 순 익*
S. I. Kwon

ABSTRACT

Effect of reentrant type bowl geometry on combustion characteristics was investigated in a D.I. diesel engine. The main factor was the cupola height of bowl center and the reentrant angle of combustion chamber, and the cylinder pressure, engine performance and emissions of the engine using the total 11 kinds of the combustion chamber were measured by test. The results are as follows. The NOx decreases by increasing the cupola height of bowl center because it makes the decreasing of maximum combustion pressure by the heat loss and smooth combustion from good air flow. The smoke increases by increasing the reentrant angle at high speed range of the engine, but decrease at low and medium speed range until the reentrant angle becomes 15°

주요기술용어 : Ignition Delay Period(착화지연기간), Bowl Geometry(연소실형상), Emissions(배기 배출물), Reentrant Angle(리엔트런트각도), Cupola Height of Bowl Center(중앙돌기부높이)

1. 서 론

디젤 기관의 연소에 미치는 중요한 인자로서 유동계, 분사계 및 연소실 3가지로 크게 나눌 수 있다. 그 중 연소실은 유동계 즉 흡기 매니폴드와 흡기포트를 통해 유입된 공기가 분사노즐에 의해 분사된 연료와 충분히 혼합함에 따라 최적의 연소상태를 만들어 주는 장소로서 그 형상은

기관의 출력 및 배기배출물에 상당한 영향을 미치고 있다. 이때문에 각 기관 메이커(Engine Maker)에서는 최적의 연소상태를 만들어 주기 위해 그 나름의 독특한 연소실 형상을 고안하여 실제기관에 적용하고 있다.

직접분사식 디젤기관의 연소실은 접시형, 볼록렌즈형, 반구형, 중앙돌기부가 있는 접시형등 여러가지가 있으나 최근에는 연소실 Bowl의 상부와 하부의 직경이 같은 토로이달(Toroidal)식과 하부의 직경이 큰 리엔트런트(Reentrant)식이 주류를 이루고 있다. 토로이달식은 연소실내의

* 정회원, 두원공업전문대학 기계과

공기유동이 작아 고압분사에 유리한 반면 리엔트런트식은 공기유동이 상대적으로 연소후반까지 지속되어 분사시기에 별로 영향을 받지않는 장점을 가지고 있다. 그러나 에미션 규제가 점차 강화되면서 최적의 연소상태와 규제만족을 위해 공기유동 및 분사계의 개선과 더불어 연소실형상도 기존의 것을 약간 개량한 형태나 전혀 새로운 형상의 연소실이 개발되어지고 있다⁽¹⁾. Isuzu⁽²⁾는 사각형 연소실을 개발하여 기관출력 및 배기배출물의 저감과 소음저감 효과를 가져 왔으며, AVL⁽³⁾은 기존의 리엔트런트형태에서 연소실의 Bowl 하부를 개량한 연소실형상을 채택하여 연소중기 이후의 공기유동을 지속시켜 배기배출물의 저감효과를 가져왔다. 한편 Saito등⁽⁴⁾은 3가지 형태의 연소실을 이용하여 기관출력, 배기배출물 및 유동특성을 조사하여 각 연소실의 연소 및 배기배출물의 특성을 비교하였다. 이처럼 연소실형상 그 자체에 대해서 각 기관 메이커 혹은 연구기관에서 많은 연구가 되어 왔으나⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 연소실 벽면각도, 중앙돌기부 높이, Bowl 상·하부 직경비등 분무와 공기유동에 영향을 미치는 각 부분에 대한 효과파악⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾은 그다지 발표되어 있지않다.

이에 본 연구는 이러한 연소실 형상에 대해 우선 연소실 Bowl의 중앙 돌기부의 높이와 리엔트런트각도의 변경을 위해 11종류의 형상이 다른 연소실을 이용하여 그 변화가 디젤기관의 출력, 배기배출물, 연소압력 및 착화지연기간등 연소특성에 어떤 영향을 미치는가에 대해 조사하였다.

2. 연소특성에 미치는 연소실형상의 주요인자

2.1 연소실 형상의 설계인자

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

2.2 공기유동에 미치는 설계인자

연소실에 관한 각종 설계인자의 설정은 설계자에 따라 약간씩 정의가 다르나⁽³⁾⁽⁸⁾⁽¹¹⁾, 각종 설계인자로는 난류에 영향을 미치는 dc/H , 스윙과

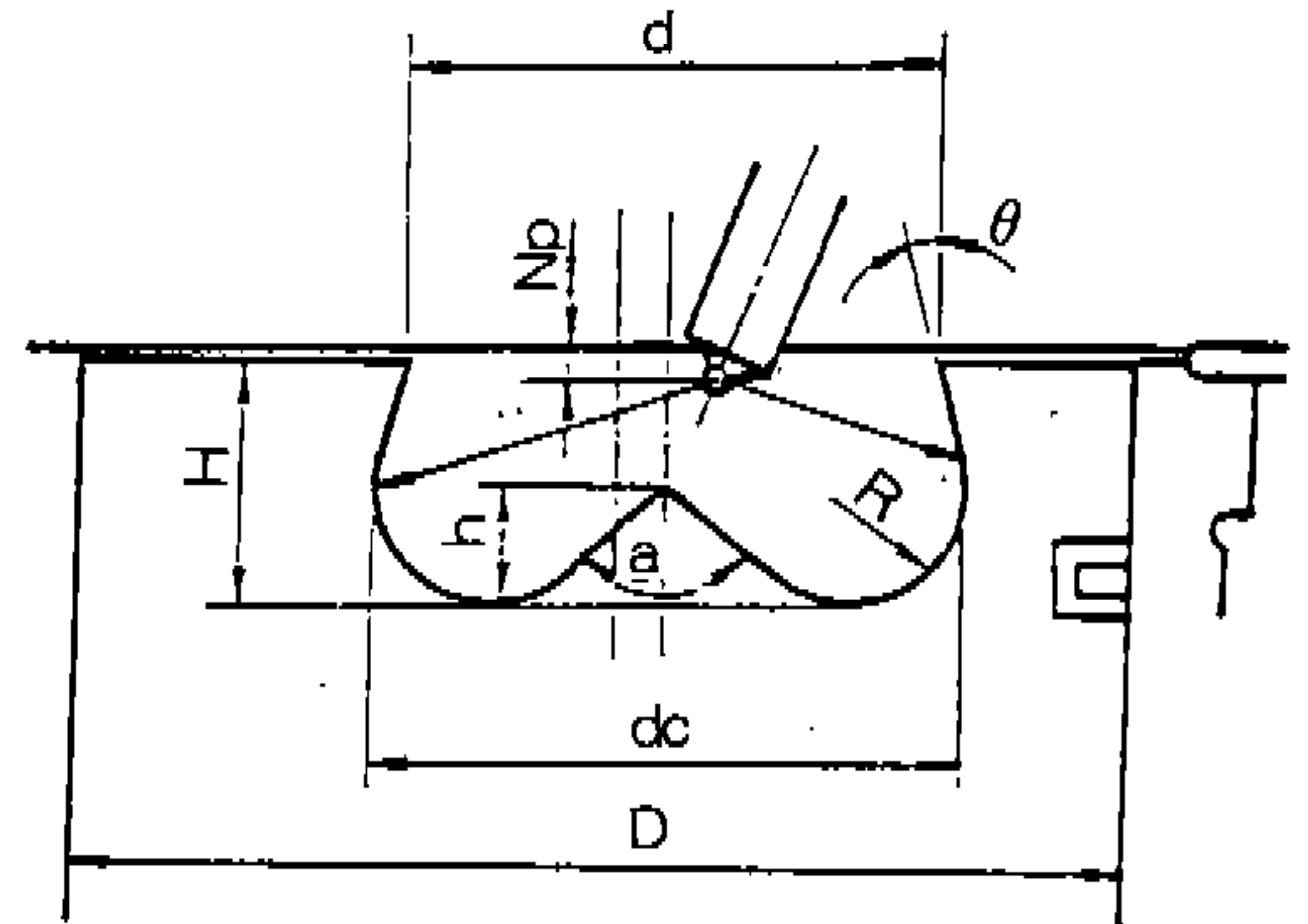


Fig.1 Definition of Bowl Geometry

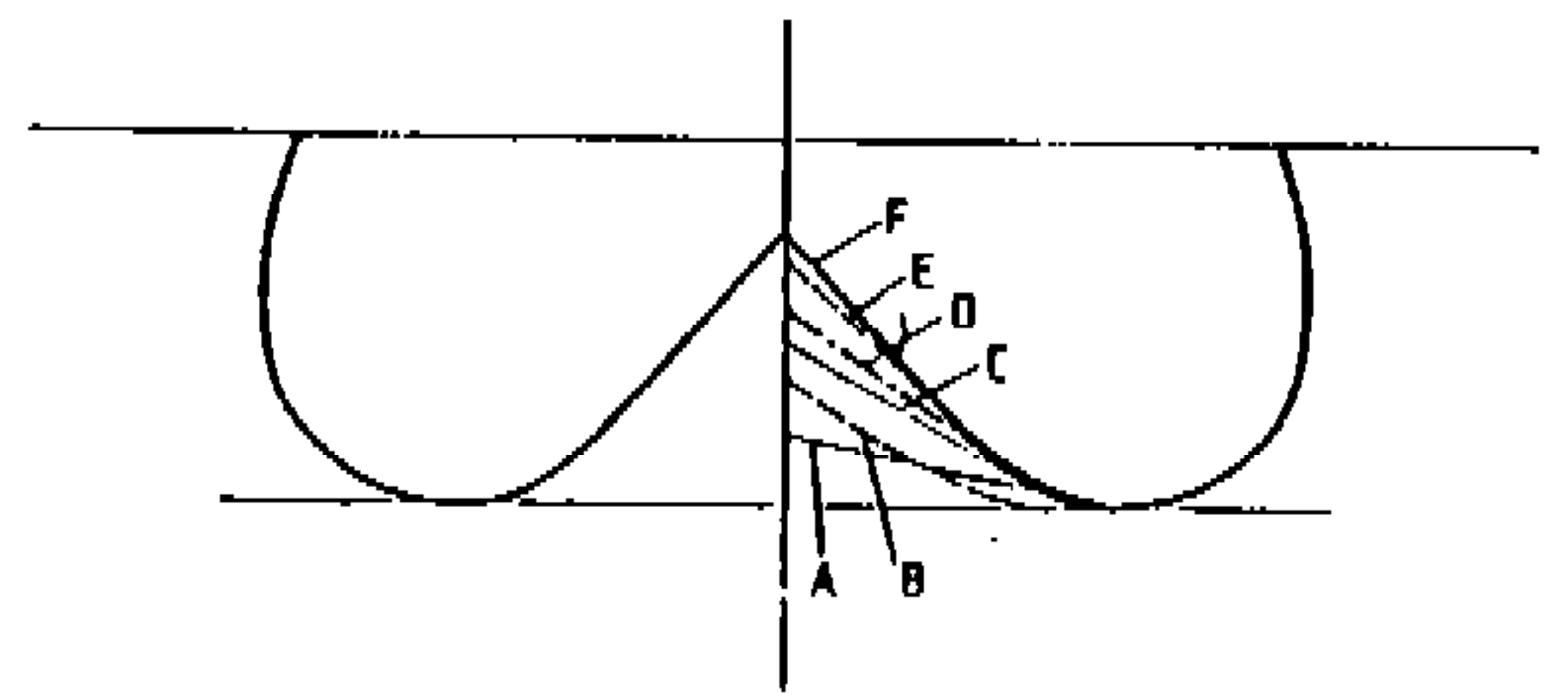


Fig.2 Comparison of Bowl Geometry for Different Cupola Height

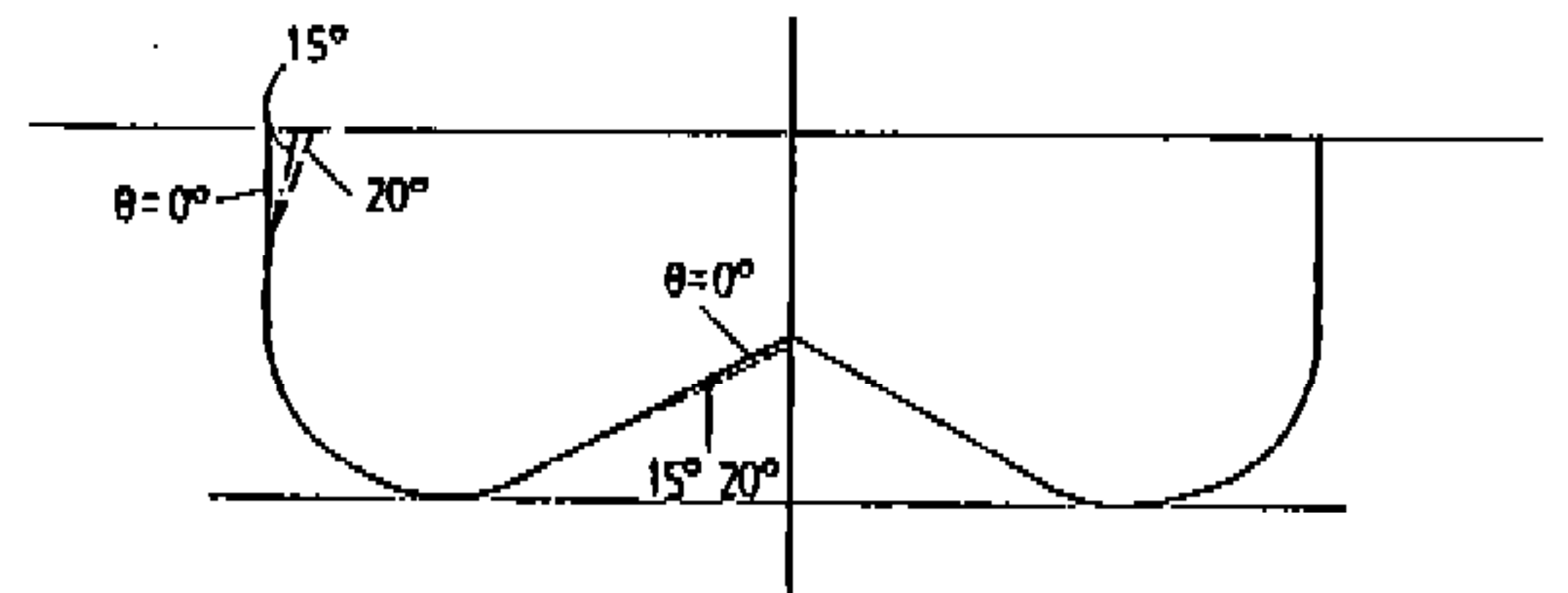


Fig.3 Comparison of Bowl Geometry for Different Reentrant Angle

Table 1 Test Parameters

Item	Parameter & Condition					
Cupola Height of Bowl Center (mm)	3.7	6.7	8.6	10.5	12.4	14.3
	A-type	B	C	D	E	F
Reentrant Angle (deg)	0		10	15	20	25
	Toroidal type			Reentrant Type		
Nozzle (common)	Hole Dia.		0.30mm			
	Hole No.		5 Holes			
	Protrusion		$N_p = 2.5\text{mm}$			
Engine Revolution	1400, 2200, 3400 rpm					

스퀴시에 미치는 d/dc (Reentrant Ratio)와 θ (Reentrant Angle), 스월에만 영향을 주는 dc/D , 또한 연소실내의 공기이용율에 영향을 미치는 V_b/V_c (k-factor⁽¹⁰⁾) 등을 들수 있다.

본 연구에서는 중앙돌기부 높이 h 와 리엔트런트 각도 인자인 θ 에 주안을 두어 고찰하기로 한다. 본 실험의 중앙돌기부 높이 변경의 효과 파악에 이용된 6종의 연소실과 Reentrant 각도 변경에 사용된 5종의 연소실의 상세 변경인자를 Table 1에, 또 사용된 각 연소실의 형상을 Fig. 2와 Fig.3에 각각 비교하였다.

3. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 단기통 직접 분사식 디젤 기관이며 그 주요 제원을 Table 2에, 또한 실험장치의 개략도를 Fig.4에 나타낸다.

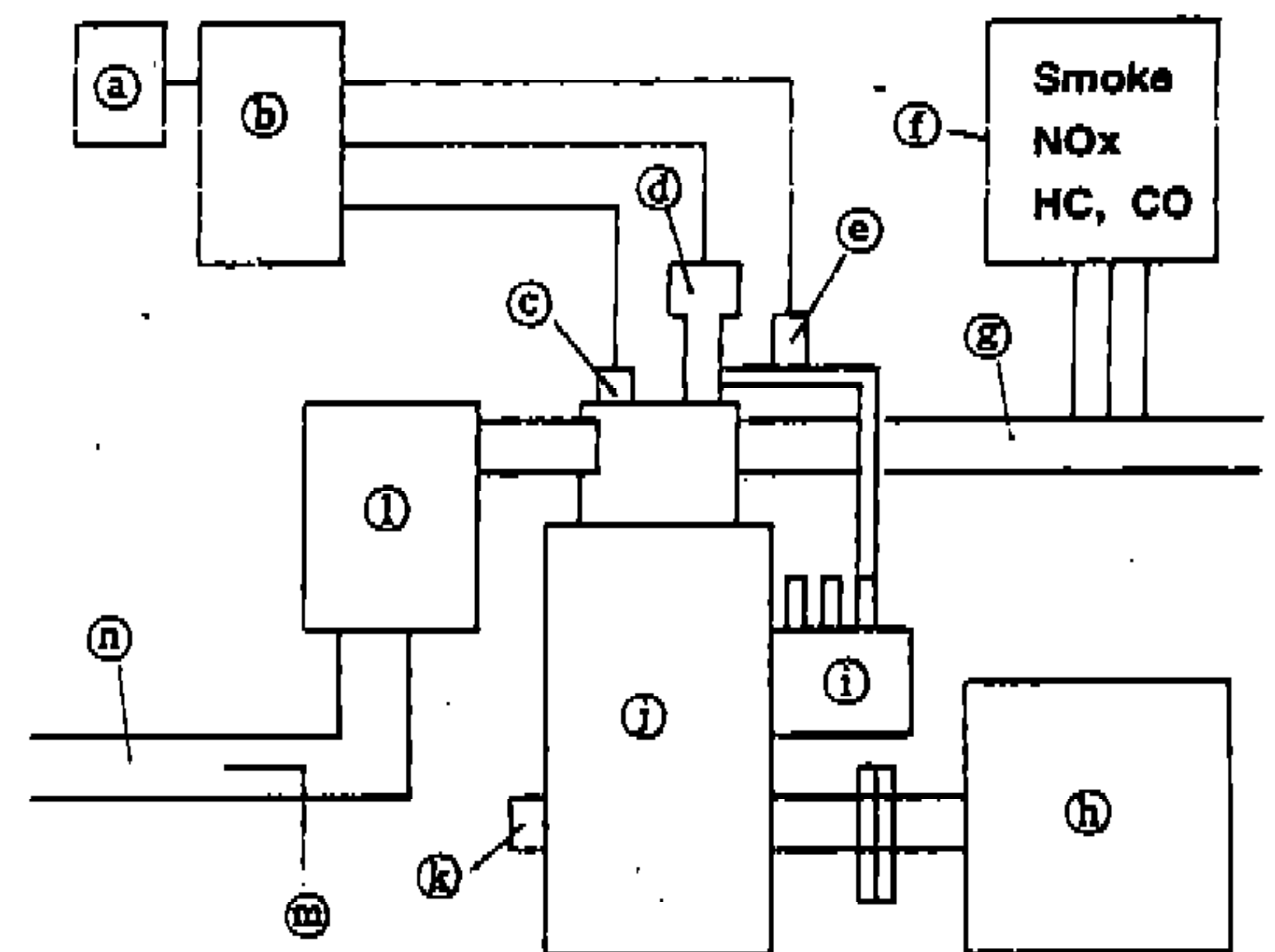
실험은 냉각수 및 오일온도를 $80 \pm 2^\circ\text{C}$, 흡기압 $-350\text{mmH}_2\text{O}/3400\text{rpm}$, 배기압 $150\text{mmHg}/3400\text{rpm}$ 의 조건으로 기관 회전속도를 1400, 2200, 3400rpm하에서 연소실을 변경시켜 전부하 상태의 기관성능, 배출가스, 연소압력 및 착화지연기간등 연소특성을 동력계(50KW, Ac Type)와 각종 센서를 이용하여 측정하였다. 연소압력 측정은 피에조식 압력변환기(VAL. QC32C-E)를 그 끝단이 연소실의 Bowl 가장자리에 오도록 설치하여 그 출력신호를 연소해석장치 (AVL, D/A 657)에 보내어 기록 및 열발생율을 계산하였으며 연소압력 데이터는 80사이클의 평균치로 나타내었다.

또한 착화지연 기간은 열발생율이 연료분사 초기의 (-)에서 0가 되는 시점을 착화점으로 보고 노즐에서 연료가 분사되는 시점으로 부터 착화점까지로 정의하여 측정하였다.

연료관내의 압력은 노즐 입구측에 피에조식 압력변환기 (AVL. 5QP6002)를 설치하여 측정하였으며 연료의 분사시기 및 분사기간은 노즐의 니들밸브 상부에 전자식 봉을 연결하여 유도전류의 변화로 부터 측정하였다. 또 흡기압력은 흡기 포트 앞쪽에 설치된 서지탱크에서, 배기압력은 배기포트 후방 15cm 위치에서 측정하였으며 흡

Table 2 Specifications of Test Engine

Item	Specifications
Bore × Stroke	104 × 105mm
No. of Cylinder	1
Swept Volume	0.892 ℓ
Valve Timing	I.V.O 17BTDC I.V.C 47ABDC E.V.O 53BBDC E.V.C 11ATDC
Injection Pump	A-TYPE
Plunger Dia.	∅ 9.5mm
Nozzle Opening Pressure	21.6MPa



- Ⓐ Oscilloscope Ⓑ Combustion Analyzer
- Ⓒ Cylinder Pressure Transducer
- Ⓓ Needle Lift Sensor Ⓔ Fuel Pressure Transducer
- Ⓕ Gas Analyzer Ⓖ Exhaust Pipe
- Ⓗ Dynamometer Ⓙ Injection Pump Ⓚ Engine
- Ⓛ Rotary Encoder Ⓜ Surge Tank
- Ⓝ Air Flow Meter Ⓨ Inlet Pipe

Fig.4 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

입공기량은 서지탱크 입구에 설치된 공기유량계로서 측정하였다.

배기배출물은 배기포트로 부터 2.5m 후방에 샘플링 프로브를 삽입하여 가스를 추출한 후 분석하였다. NOx분석에는 화학발광식 NOx측정기 (Horiba제, CLA-53)를, CO 분석에는 비분산

형 적외분석식 CO측정기 (Horiba제 AIA-23A, S)를, THC(Total HC)분석에는 수소염이온화 검출식 THC측정기(Horiba MZXA-1120 TF1-H)를, 스모크측정은 Bosch식 스모크미터(Zexel 제)를 이용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 중앙돌기부높이의 영향

연소실내의 중앙돌기부 높이의 변화에 따른 연소실의 압축비와 돌기부의 각도를 Fig.5에 나타내었다. 연소실내 Bowl의 중앙 돌기부의 효과를 파악하기 위해 연소실의 다른 형상은 그대로 두고 돌기부의 높이만 변경시켰다. 압축비를 동일하게 하기 위해 연소실의 다른 형상을 변화시킬 경우 분무의 도달거리 및 충돌시의 혼합이 달라지기 때문에 압축비 변화를 감수하는 것이 더 효과적일 것으로 생각할 수 있다.

돌기부 높이의 변경에 따라 압축비의 변화가 최저 17.3에서는 최고 18.4까지 1.1의 차이를 나타내고 있다. 일반적으로 압축비의 변화는 착화지연기간의 변화를 가져와 출력 및 배기배출물에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나 압축비 1.1의 변화가 압력상승율, 최고압력 및 열효율에 미치는 영향이 그다지 크지 않다는 연구결과⁽¹²⁾와 후술하는 Fig.6에서 알 수 있는것 처럼 착화지연기간에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 보아 압축비 변화에 따른 착화초기의 연소성능의 변화는 적을것으로 생각되어 진다.

Fig.6은 연소실 중앙돌기부의 높이를 변경시켰을때 엔진회전속도 1400rpm에서의 성능 및 연소특성을 나타내었다. 돌기부높이가 높아짐에 따라 연료소비율은 조금씩 악화되고 있으나 매연은 점차 증가하다가 높이가 가장 높은 14.3mm에서는 오히려 감소하고 있다. 또한 배기온도도 돌기부가 높아질수록 증가하고 있다.

Fig.7은 엔진회전속도 1400rpm에서의 연소압력 곡선을 나타낸 것이다. 중앙돌기부 높이의 증가에 따라 착화지연기간은 동일하나 착화후의 압력 상승이 달라 돌기부높이가 높을수록 최고압력이 낮아져 연소실내의 가스 평균온도도 낮음을 알

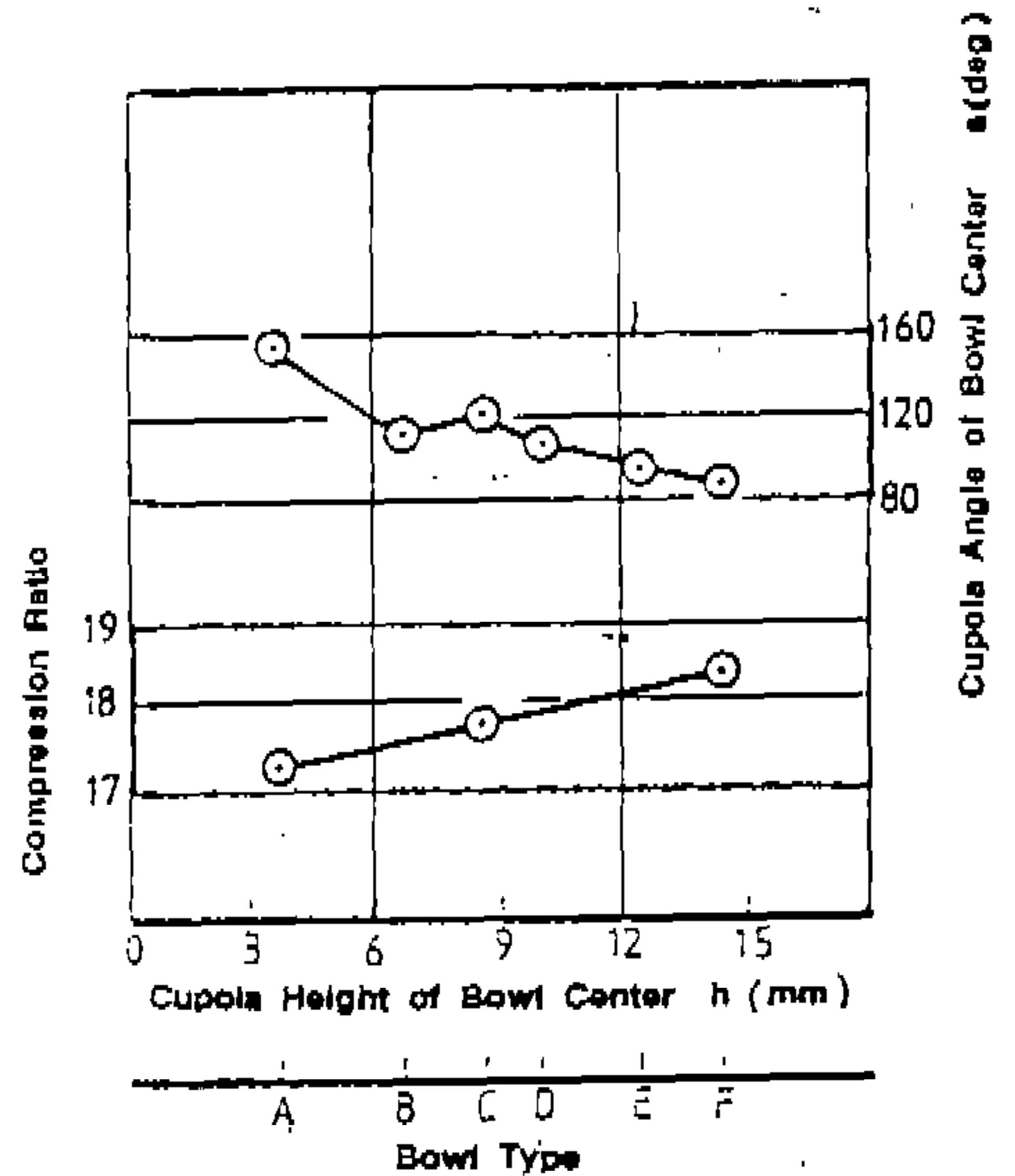


Fig.5 Comparison of Bowl Geometry on Specification

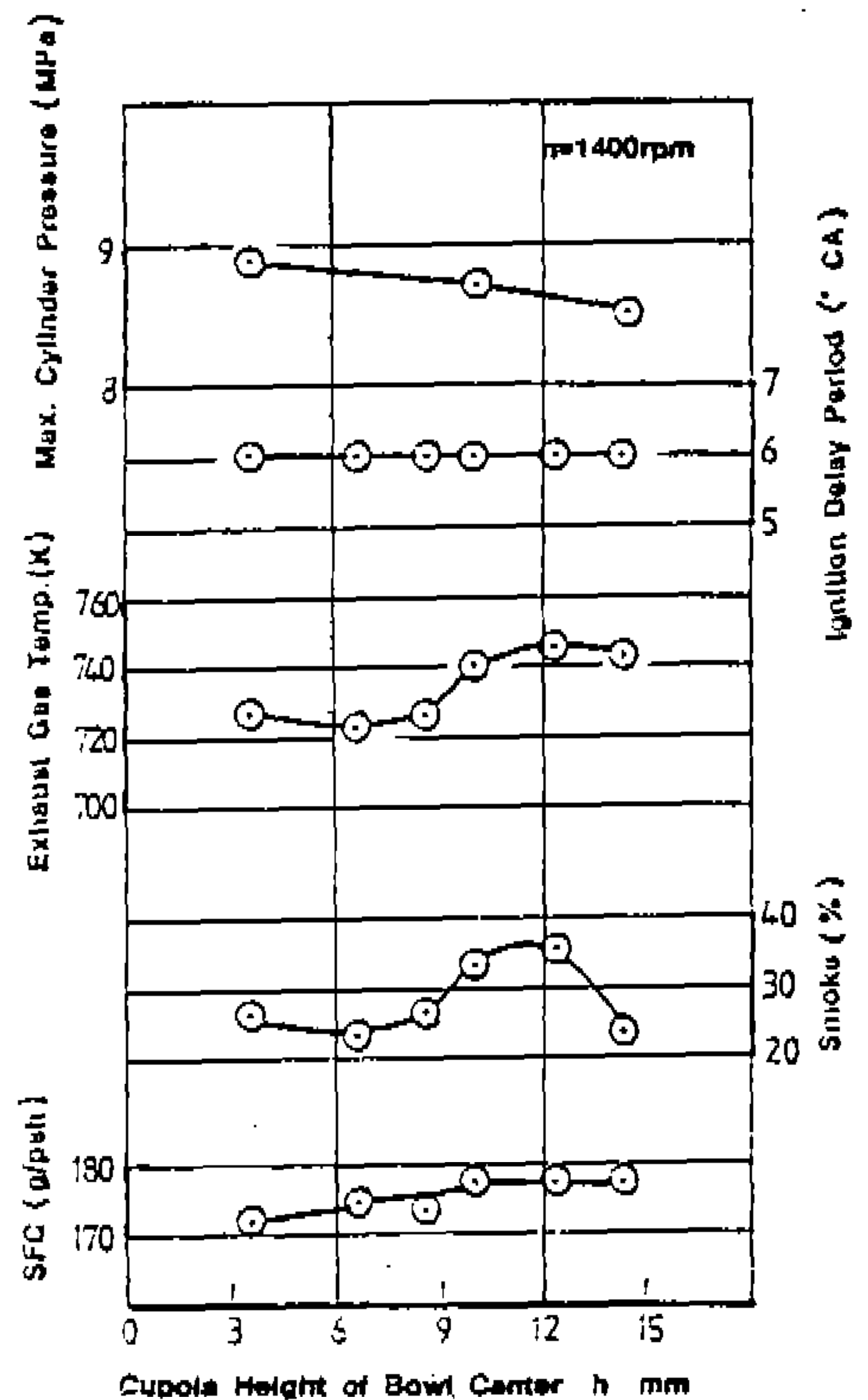


Fig.6 Comparison of Bowl Cupola Height on Combustion Characteristics at 1400rpm

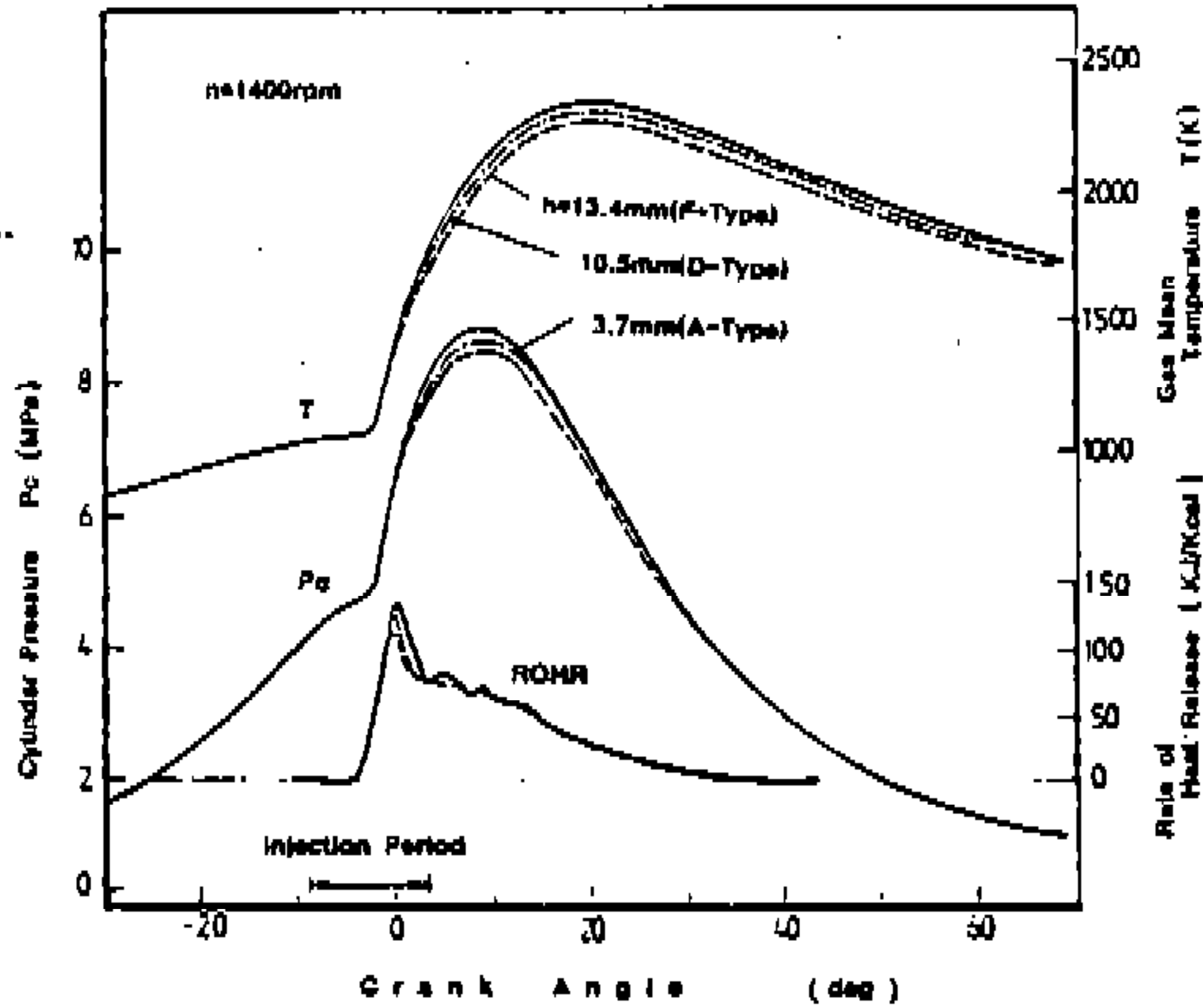


Fig.7 Comparison of Combustion Characteristics for A, D and F-Type Bowl

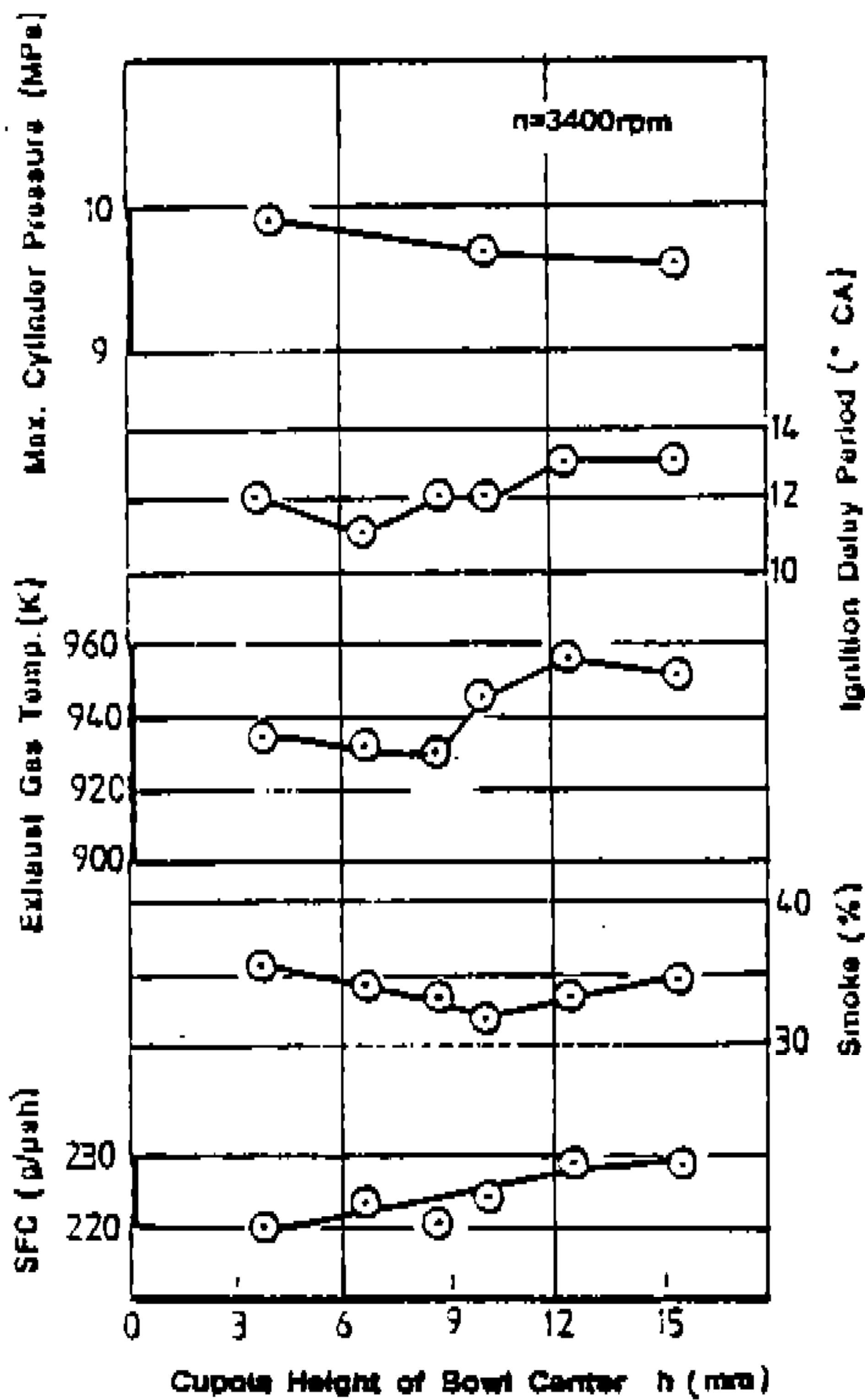


Fig.8 Comparison of Bowl Cupola Height on Combustion Characteristics at 3400rpm

수 있다.

Fig.8은 엔진회전속도 3400rpm에서의 성능과 연소특성을 나타 내고 있다. 저속때와 마찬가지로 중앙돌기부 높이가 증가함에 따라 연료소비율도 증가하고 있으나 매연은 돌기부높이 10.5mm 때가 가장 낮고 그 전후로 돌기부높이를 변경시키면 증가하고 있다. 또한 착화지연기간은 약간의 차이를 나타내고 있으나 전반적으로 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

돌기부의 높이 증가가 연료소비율의 악화를 가져오는 것은 초기연소때에는 스퀴시와 난류가 강해 예혼합이 활발하여 순차적으로 연소함에 따라 최고압력이 상대적으로 저하한 것과 또한 돌기부 높이의 증대에 따른 연소실 표면적의 증가로 열손실이 증대한 것으로 생각되어 진다. 일반적으로 스월비의 증가에 따라 저속에서는 연비가 좋아지고 고속에서는 연비가 오히려 악화되는 경향이 나, 본 실험에서는 Fig.6과 Fig.8에서 본 바와 같이 전 영역에서 중앙돌기부 높이의 증가에 따라 연소 최고압력이 낮아지며 연료소비율이 악화되고 있다. 그러나 착화지연기간은 돌기부높이에 관계없이 일정함을 나타내고 있다. 이는 연소실 벽에 분무가 직접 충돌한후 Bowl곡면을 따라 확산 되면서 공기와 혼합되는 연소과정으로 보아 Fig.7의 연소압력 곡선에서 알 수 있는 비와 같이 돌기부는 착화 직후의 급격한 확산연소시에 영향을 주어 이것이 연소 중, 후반기의 매연발생에 영향을 미친 것으로 생각할 수 있다.

중앙돌기부 높이의 변화가 배기배출물에 미치는 영향을 6-Mode로서 실험한 결과를 Fig.9에 나타내었다. 높이가 증가할수록 CO는 동등 내지 약간 저하하고 THC와 NOx는 급격히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 앞의 Fig.7의 연소압력 및 온도곡선에서 알 수 있는 것처럼 돌기부가 높을때 연소실내의 가스의 최고온도가 돌기부가 낮을때의 온도와 비교해서 상대적으로 낮아짐에 따라 NOx 생성이 저하된 것으로 판단된다. 또한 THC는 Fig.6과 Fig.8의 배기가스의 온도

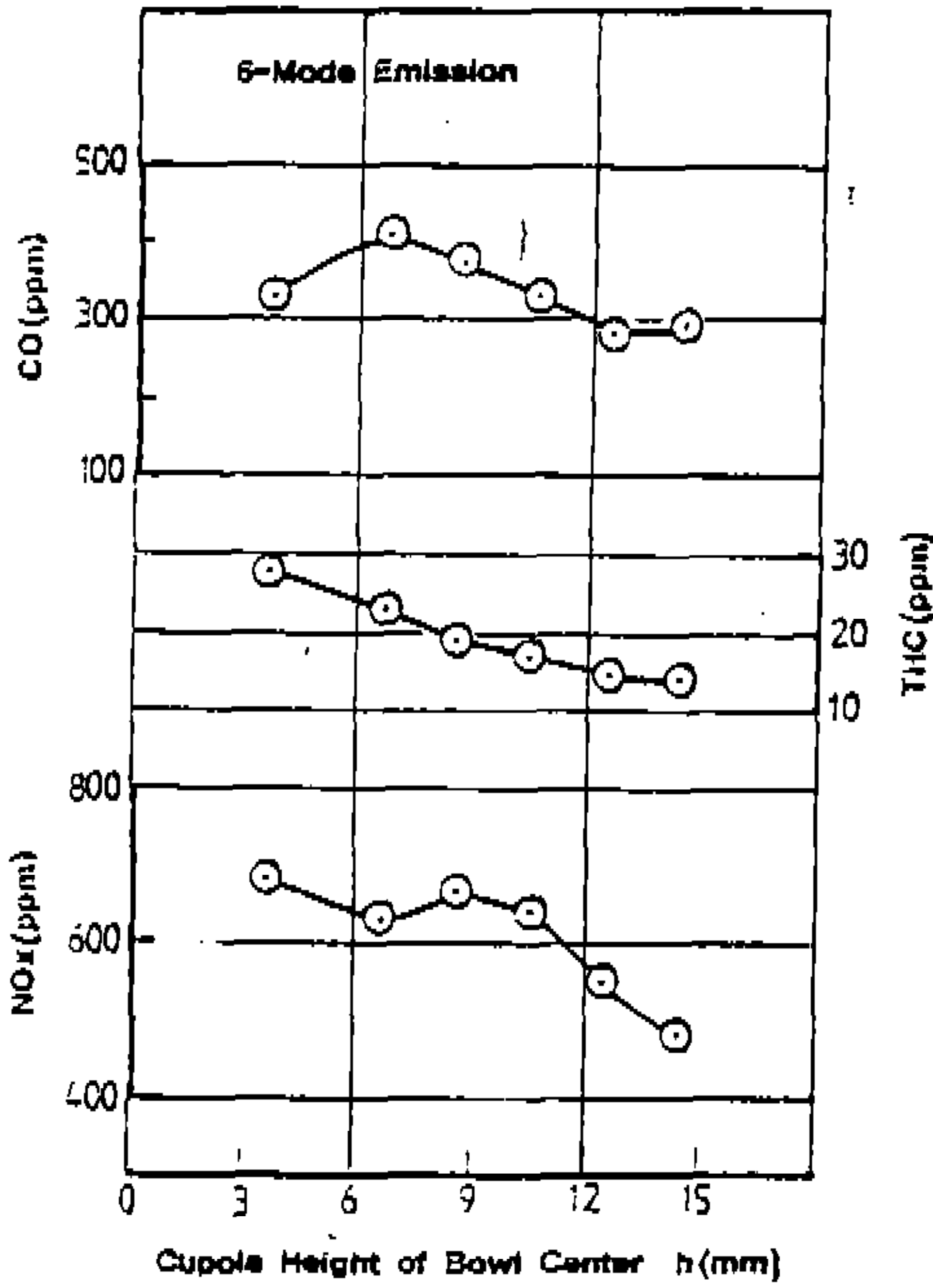


Fig.9 6-Mode Emission of Bowl Cupola Height

가 돌기부 높이의 증가에 따라 상승하는 것으로 보아 연소후반에서의 연소실내의 온도가 높아진 것으로 판단되며, 이로 인해 HC의 발생량이 줄어든 것으로 생각할 수 있다.

이상의 결과로부터 연소실내 Bowl의 중앙돌기부의 높이를 변경시킬때 돌기부의 높이가 분무의 착화에는 전혀 영향을 주지않고 착화이후의 공기의 흐름과 분무의 혼합과정을 통해 연비와 배기 배출물에 영향을 미친것으로 판단된다. 이는 Sato 등⁽¹³⁾의 연구에서도 알 수 있는 바와 같이 중앙돌기부 주위에서의 난류에너지는 TDC때 돌기부의 형상에 영향을 받지 않는 것으로 조사된 것으로 보아 분무가 연소실 벽면에 충돌하여 벽면을 따라 흐르면서 착화되므로⁽¹⁴⁾ 착화때까지의 연소실내의 혼합 상태에는 변화가 없는것으로 보여진다. 또한 돌기부높이의 증가에 따라 NOx가 저감된 것은 압축비 상승에 따른 압축온도 상승으로 인한 착화지연의 저감효과가 나타나

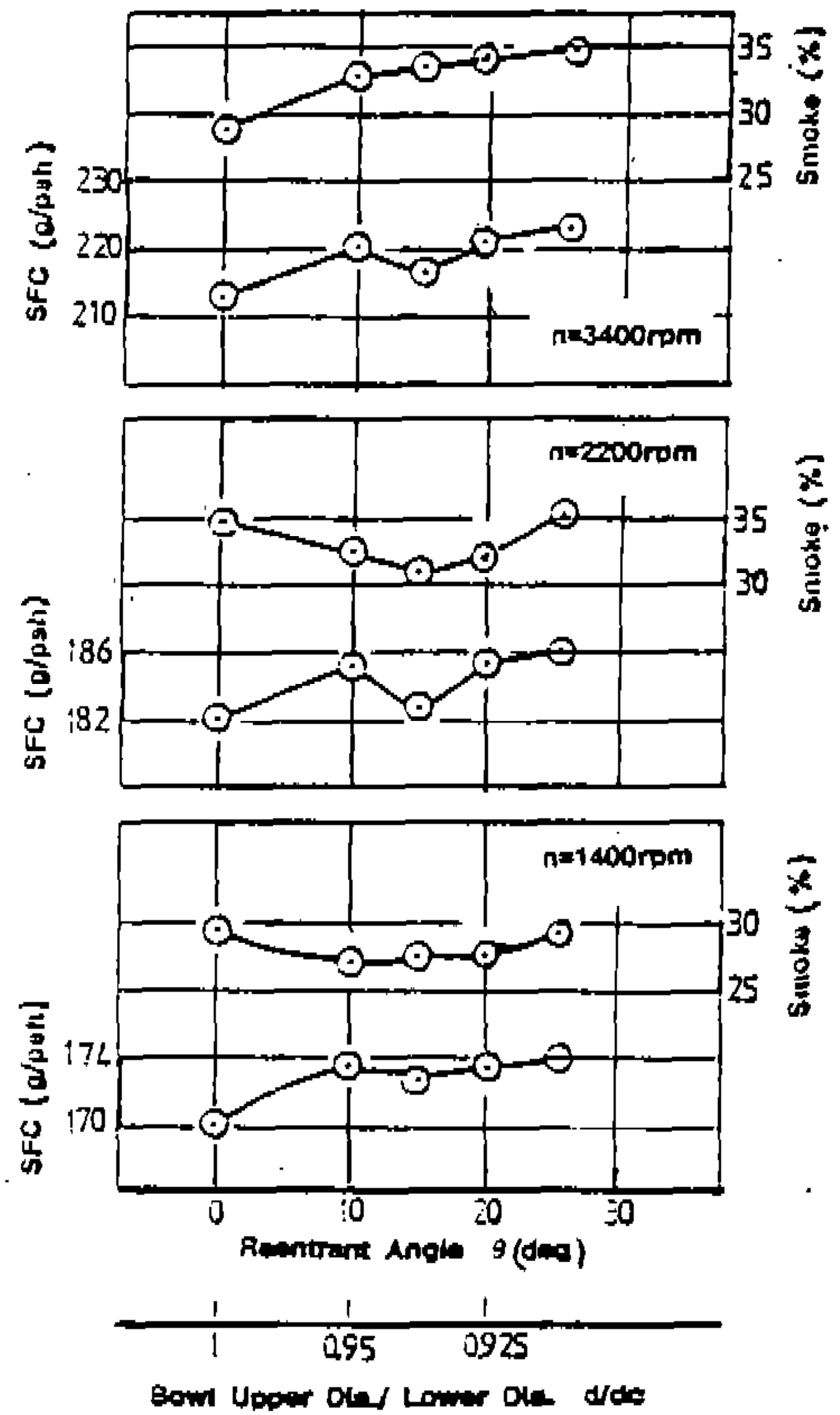


Fig.10 Engine Performance of Different Angle

지 않는 것으로 보아 표면적 증대에 의한 연소실 벽면으로의 열손실 증대와 착화 직후의 공기유동이 돌기부로인해 유동의 강도가 점차 Bowl의 하부의 구형 중심부로 이동되어 분무와의 혼합이 좋아져서 연소가 완만히 진행된 것으로 생각되어진다.

4.2 리엔트런트각도의 방향

연소실 상부의 벽면각도를 0°의 Cylindrical 형태에서 10°, 15°, 20°, 25°의 리엔트런트형으로 변경시킬때의 연료소비율과 매연농도를 Fig. 10에 나타내었다. 리엔트런트 각도변화에 따른 압축비변화는 중앙돌기부 높이를 조정하여 각 연소실의 압축비를 동일하게 하였다. 이경우 중앙돌기부 높이의 변화는 미소하므로 이 높이가 연

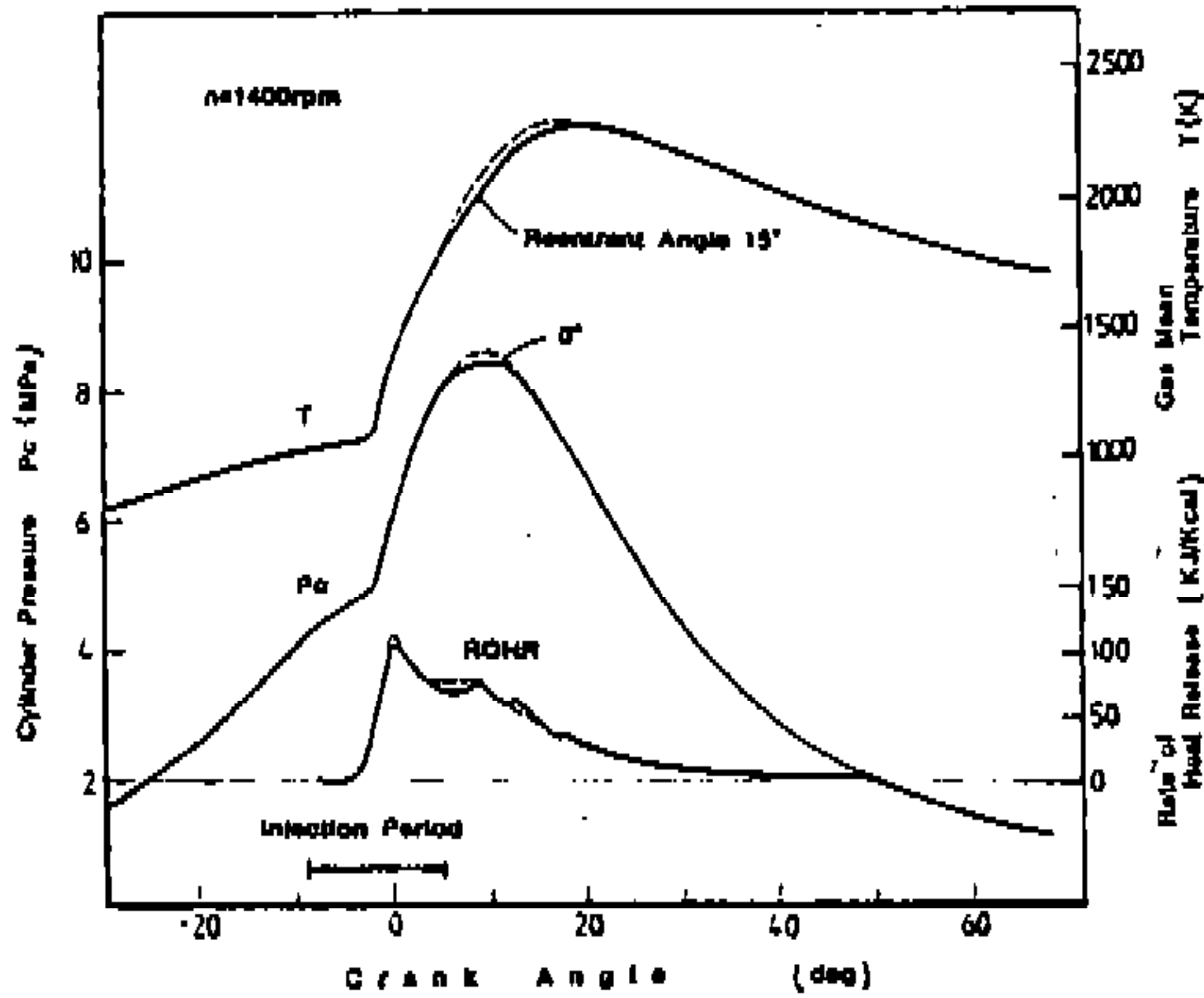


Fig.11 Comparison of Combustion Characteristics for Reentrant Angle 15° and 0°

소에 미치는 영향은 작을 것으로 생각된다. 연료 소비율은 전구간에 걸쳐 리엔트런트각도 0° 때가 가장 우수하며 각도를 크게 할수록 조금씩 악화되는 경향을 보이고 있다. 매연은 고속의 경우 각도 증가와 함께 악화되고 있으나, 중·저속의 경우는 10°, 15° 때 가장 낮고 그 전후로는 약간 악화되고 있다.

Fig.11은 기관 회전속도 1400rpm에서 리엔트런트각도 0°와 15° 때의 압력곡선을 비교한 것이다. 연료가 분사되어 착화되기까지의 착화지연 시간은 동일하나 착화후의 최고압력은 0°가 15°보다 높아 연소가스 평균온도도 상대적으로 높게 형성되어 Fig.12의 배기배출물에서 나타낸 바와 같이 NOx의 배출량이 0° 때가 높음을 알 수 있다.

리엔트런트각도를 변경 시키기 위해 Bowl의 상부 직경을 변화 시킴으로서 Bowl의 직경감소에 따라 스퀴시속도가 증가할 뿐만 아니라 스윙비가 증대함으로써 실린더내의 공기흐름 특성은 Bowl직경에 의해 크게 좌우된다. Sato⁽¹³⁾와 Mori등⁽¹⁵⁾의 수치 계산을 보면 리엔트런트각이 있는 경우가 없는 경우(Reentrant 0°), 또는 리엔트런트각도가 6°와 20°를 비교할 경우 각도가 큰 쪽이 TDC이후의 스퀴시류, Bowl내의 난류 및 스윙이 강해 이것이 분무와 공기의 혼합을 촉진시켜 예혼합이 활발하게 순차적으로 연소함에

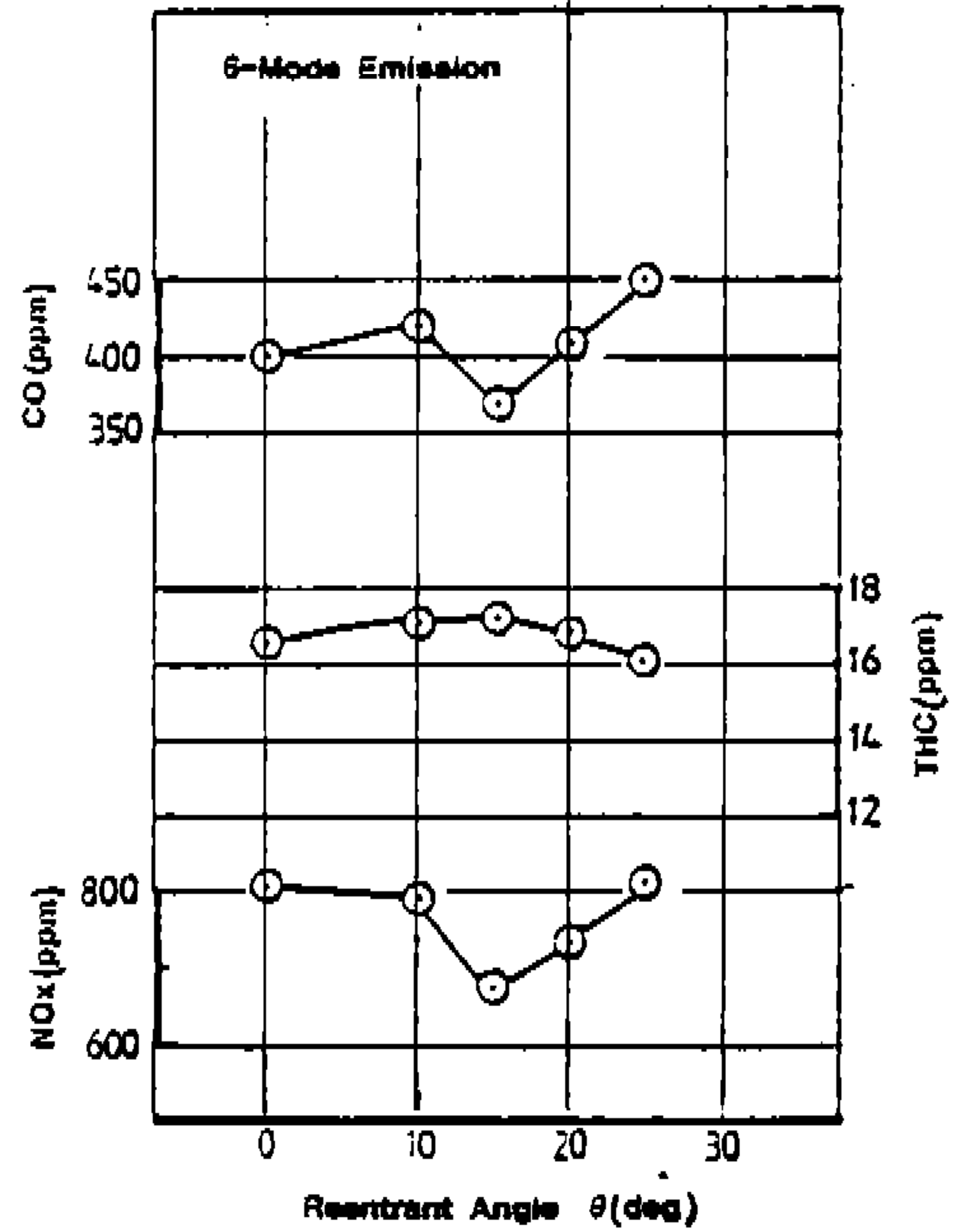


Fig.12 6-Mode Emission of Different Reentrant Angle

따라 Fig.11에서 보는 바와 같이 연소 제어기간 중의 최고압력이 약간 저하한다. 또 팽창행정에서의 연소때는 TDC 이후의 스윙의 감쇄가 적으므로 화염과 신기가 잘 혼합하여 이것에 의해 연소 중, 후반기의 확산연소를 촉진시켜 Fig.10의 중·저속 구간에서 매연저감 효과를 가져온 것으로 생각되어 진다.

그러나 Hou등⁽¹⁶⁾이 시뮬레이션을 이용하여 각종 연소실에서의 계산 및 실험한 결과에 의하면 리엔트런트형이 토로이달형(리엔트런트각도 0°)에 비해 스퀴시 및 난류가 강하여 상사점후의 Bowl내의 스윙의 감쇄는 적으나 Bowl내에서의 활발한 공기유동 특성이 과스윙을 생성하여 반드시 유리한 엔진성능을 가져온다고는 할수 없으며 오히려 공기유동의 정도가 낮은 경우에 그 우위성이 발휘된다는 결과를 참고로 하면 Fig.10의 고속구간의 매연배출 증가와 Fig.12의 배기배출물처럼 리엔트런트각도 15° 때가 NOx의 및 CO의 배출량이 가장 적고 각도를 크게 할수록 다시 악화하는 결과와 일맥 상통하는 것으로 생각 할

수 있다. 또한 디젤엔진의 연소는 분무의 미립화, 공기유동 및 연소실의 기하학적 형상의 3개 요인에 의해 좌우되므로 단지 연소실형상 한가지 요인만 변경시켜서 얻은 결과로 그것이 가장 적합하다고는 할 수 없으나 전체적인 경향을 살펴 보는데는 어느정도 타당성이 있을것으로 사료된다.

5. 결 론

Bowl의 중앙 돌기부의 높이와 리엔트린트각도를 변경 시킨 연소실을 제작하여 기관 성능 및 연소 해석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연소실내 Bowl의 중앙돌기부의 높이를 크게 할수록 연소 최고압력이 저하하여 연료 소비율은 증가하나, 연소실내의 최고 연소 온도의 저하로 NO_x 배출량은 감소한다.
- 2) 연소실내 Bowl의 중앙돌기부의 높이에 관계없이 착화지연기간은 거의 일정한 경향을 나타내었다.
- 3) 리엔트린트각도를 증가시킴에 따라 매연농도는 고속에서는 증가하나 저·중속에서는 15°까지는 좋아지나 그 이후로 다시 증가하는 경향을 갖는다.

참 고 문 헌

1. D.M. Doyle, "Direct Injection Combustion Principles and Practice for Low Emissions", 19th International Congress on Combustion Engines(CIMAC), 1991
2. N.Yanagisawa and T.Takatsuki, "Combustion Chamber for D.I. Diesel Engine", Internal Combustion Engine, Vol.26, No. 338, pp.63-68, 1987
3. F.Schweitzer, "Valve Controlled Compression Ignition Engine", U.S Patent No. 4779587, 1988
4. T.Saito, Y.Daisho, N.Uchida and N. Ikeyama, "Effects of Combustion Chamber Geometry on Diesel Combustion", SAE 861186, 1986
5. S.Miura, S.Aoki, T.Watanabe and K. Ishigawa, "Combustion Improvement with Cutouts on the Lip of a Reentrant Combustion Chamber in D.I. Diesel Engines", Symposium of SAE of Japan, 924, No. 924121, 1992
6. H.Kasanami, Y.Tamai and K.Kojima, "Power Unit for New ELF", Internal Combustion Engine, Vol.33, No.415, pp.25-37, 1994
7. H.Okigawa and T.Shimada, "Improvement of Fuel Economy on Automobile Diesel Engine and Its Countermeasures", Internal Combustion Engine, Vol.22, No. 284, pp.63-74, 1983
8. S.Yoshigawa, "An Experimental Study of Combustion Characteristics in a D.I. Diesel Engine", A Thesis for a Doctorate of University of Hiroshima, pp.11-71, 1989
9. H.Hiroyasu, S.Yoshigawa, M.Arai and R. Furusawa, "The Effects of Spray Characteristics on Engine Performance in a Small Direct Injection Engine", Transactions of JSME(B), Vol.54, No.502, pp. 1522-1525, 1988
10. S.Ishida, R.Kihara and M.Furubayashi, "Development Status of a Small Direct Injection Engine at Isuzu", SAE 850068, 1985
11. S.Daidoji, "The Combustion Chamber Design of Diesel Engine in Theory and Practice", Sankaido, pp.115-119, 1987
12. 深澤 正一, "壓縮着火機關の燃燒", 內熱機關の燃燒, 山海堂, pp.233-239, 1973
13. K.Sato, L.Zhang, T. Minami, T.Takatsuki and K.Yokota "In-Cylinder Combustion Flow Study of a DI Diesel Engine-The Effect of Combustion Chamber Geometry on In-Cylinder Flow-", Proceedings of JSAE

(924), No.924120, 1992

14. S.I. Kwon, M.Arai and H.Hiroyasu, "Effects of Cylinder Temperature and Pressure on Ignition Delay in Direct Injection Diesel Engine", Bulletin of Marine Engineering Society in Japan, Vol.18, No.1, pp.3-16, 1990
15. 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
16. Z.Hou and H.kijawa, "Effects of Combustion Chamber Geometries on In-Cylinder Flow Motion and Exhaust Emission in a Direct Injection Diesel Engine", The 10th Internal Combustion Engine Symposium, Japan, pp.13-18, 1992