〈논 문〉 SAE NO. 933737

부실식 정적연소실내 연소특성에 관한 연구(I)
-연락공의 기하학적 형상이 연소에 미치는 영향-
Combustion Characteristics in a Constant Volume Combustion Chamber with Sub-chamber(I)
-Effect of Geometric Configurations of Passagehole on Combustion-

김 봉 석*, 권 철 홍*, 류 정 인**
B. S. Kim, C. H. Kwon, J. I. Ryu

ABSTRACT

To construct the design back data for a lean-burn gas engine, we have designed a constant volume combustion chamber with sub-chamber. With constant volume ratio of main-sub combustion chamber and constant equivalence ratio of methane-air mixture, the influence of geometric configurations(diameter, injection angle, number, length) of passagehole upon combustion characteristics were studied. It was found that combustion characteristics in the main combustion chamber were greatly influenced by the injection angle and length of passagehole.

주요기술용어 : Combustion Characteristic(연소특성), Sub-chamber(부실), Geometric Configuration (기하학적 형상), Passagehole(연락공), Schlieren Photograph(쉴리렌사진), Combustion Promotion(연소촉진)

1. 서 론

최근 급격히 부상하고 있는 지구환경보존 및 에너지절약 문제에 능동적으로 대처하기 위하여 수송용 엔진의 희박연소기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.[1] 희박연소를 하게 될 경우 배기의 청정화 특히 CO, NO_x의 저감이 가능하고, 열효율의 향상은 물론 연료소비율의 저감을 기대할 수 있으며, 엄밀한 공연비 제어가 불필요하다는 등의 유리한 점이 많다.

특히 clean energy인 가스를 연료로 사용하는 가스엔진의 희박연소기술은 실린더내 직접분사 방식의 경우 고압의 가스가 필요하고 흡기포트내로 분사하는 방식도 최소한 중압의 가스가 필요하기 때문에 저압의 가스를 사용하는 경우에는 부실식 연소방식이 유효한 것으로 보고되고 있다.[2-3]

이와 같은 부실식 연소방식은 부실로부터 분출되는 화염에 의해 주실내 혼합기가 착화되고, 난류연소를 야기하기 때문에 주로 부실의 형상, 점화위치, 주·부실의 체적비, 당량비, 직경 등을 중심으로 연구가 행해져 왔으며, 이들 중 연락

* 정회원, 한국에너지기술연구소 수송기술연구팀
** 정회원, 충남대학교 공과대학 기계공학과

공의 직경이 주실내 연소특성에 가장 큰 영향을 주는 인자로 밝혀졌다.[4~10]

본 연구는 이상의 관점으로부터 부실식 정적 연소실을 이용, 연락공의 직경 뿐만 아니라 기하학적 형상을 변화시켰을 때 주실내 연소특성을 조사하여 실제 부실식 가스엔진의 설계시 기초자료로 활용하고자 하였다.

연소특성 분석은 기본적으로 연소압력과 쉴리렌사진촬영 결과를 이용하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험장치의 개략도로서 정적연소실, 점화장치, 혼합기 제조장치, 쉴리렌사진 촬영장치, 압력측정장치 그리고 데이타 수집 및 해석장치로 구성되어 있다.

황동제의 원통형 정적연소실은 직경 80mm, 폭 40mm(체적 200cc)의 주실과 직경 30mm, 폭 40 mm(체적 28.3cc)의 부실 그리고 양실을 연결하는 교환가능한 원통형 연락공으로 이루어져 있다(Fig. 2 참조). 주·부실의 양 측면에는 화염

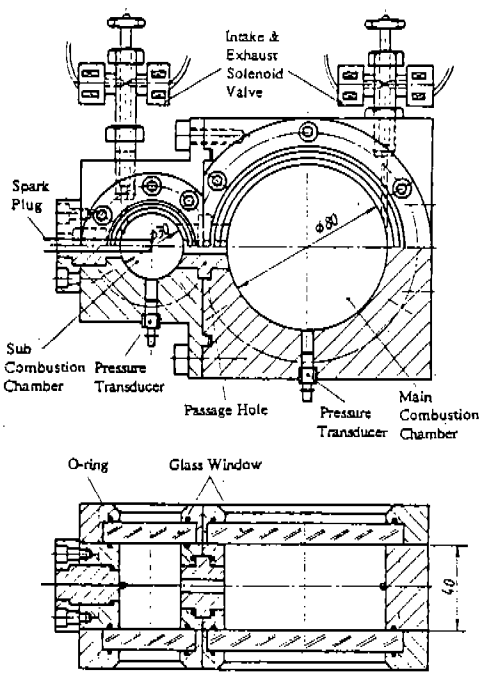


Fig.2 Combustion chamber

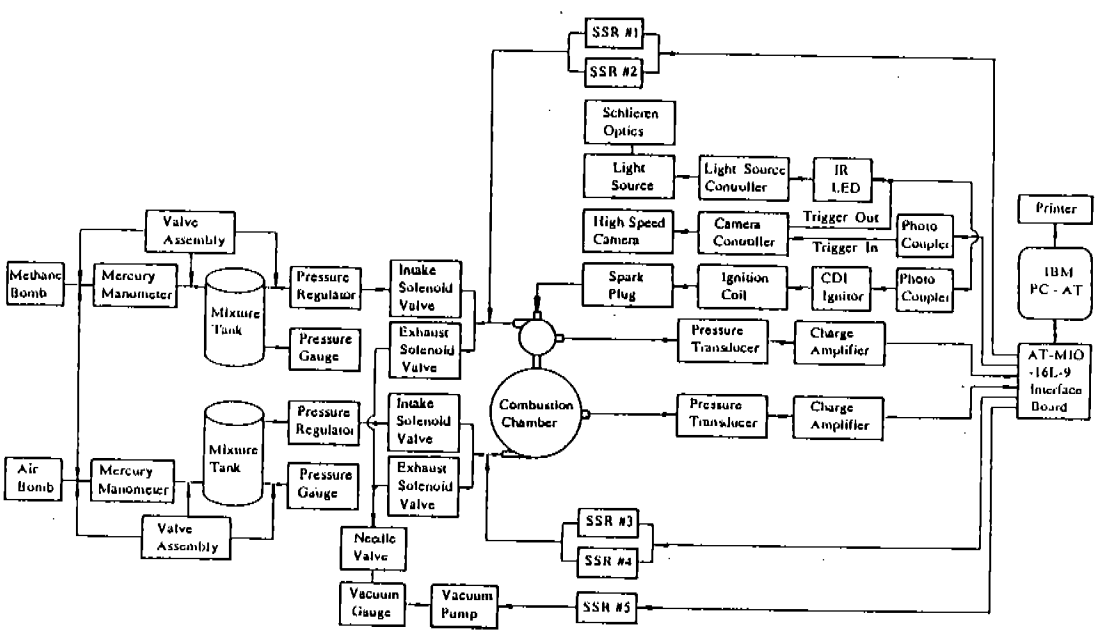


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

전과과정을 가시화하기 위하여 두께 10mm의 관측용 유리창을 설치하였다.

부실상단과 주실하단의 접선부위에는 예혼합기 및 배기가스의 흡·배기를 위해 SSR(solid state relay)과 연결된 솔레노이드 밸브(밸브장착으로 인한 연소실의 체적증가 및 이상연소를 방지하기 위해 니들선단이 연소실벽면에 위치하도록 설계되어 있음)가 부착되어 있으며, 컴퓨터의 제어신호에 의해 온라인으로 작동된다.

부실내 혼합기를 점화시키기 위해 부실의 중앙위치에 electrode 직경 1mm, 간극 1mm인 針端形의 점화플러그가 설치되어 있으며, 용량방전점화장치(CDI, capacitor discharge ignitor)와 자동차용 점화코일에 의해 방전, 점화된다.

연료-공기의 혼합비는 각각의 분압을 기초로 결정하였으며, 메탄(순도 99.9%)과 탈습공기를 혼합용기내에서 팬으로 충분히 교반, 혼합시켜 필요한 예혼합기를 만들었다.

연소실내의 화염전파과정은 xenon pulse type의 light source(Cordin Model 359, maximum energy : 1,100mJ), schlieren concave mirror(촛점거리 1.5m, 유효직경 250mm)등으로 구성된 광학시스템으로 가시화 하였고, 쉴리렌사진 촬영에는 drum형의 16mm 고속도카메라(Cordin Model 350F, maximum framing rate : 35,000fps)와 ASA 100의 Kodak제 Tri Plus-X film을 사용하였다.

연소실내의 압력을 측정하기 위해 주·부실의 중앙측면에 압전식 압력변환기(Kistler Model 601A)를 각각 설치하였으며, 압력변환기의 출력은 증폭기(Kistler Model 5007)를 사용하여 증폭시킨 후, A/D converter를 거쳐 컴퓨터 디스크에 저장하였다.

이상의 일련의 과정은 A/D, D/A 및 counter의 기능을 갖춘 interface board(National Instrument Model AT-MIO-16L-9, 12bit, maximum data acquistition rate : 100ksamples/sec)를 이용하여 컴퓨터로 온라인화 시켰으며, 얻어진 데이타의 저장 및 분석 또한 동일 컴퓨터로 수행하였다.

2.2 실험방법

실험은 혼합기 제조장치에 의해 만들어진 예혼합기를 진공펌프에 의해 진공상태로 미리 소기된 연소실내에 압력 레귤레이터를 통하여 1.5332kg/㎠(실온)의 초기압 상태로 균일하게 충진하고 유동이 거의 정지된 시점(3분 후)에서 시작하였다.

쉴리렌사진 촬영시에는 고속카메라의 shutter open signal을 동기신호로, 이외의 경우에는 컴퓨터의 트리거신호를 동기신호로 사용하였으며, 혼합기의 당량비는 주·부실 모두 1.0이다.

Table 1은 실험에서 사용된 6종의 연락공의 형상 및 치수를 나타낸 것이며, 모든 연락공의 전체길이는 20mm이다. 연락공 타입은 직경, 각도(單孔 및 二孔), 갯수 및 2차 연락공길이에 따라 구분하였다.

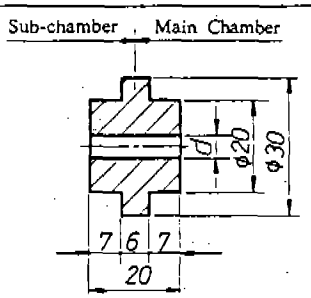
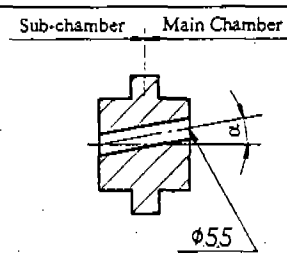
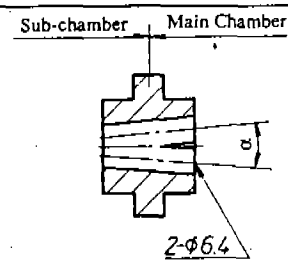
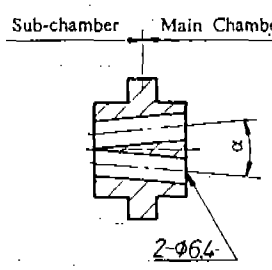
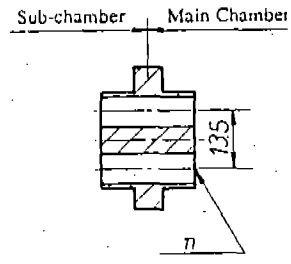
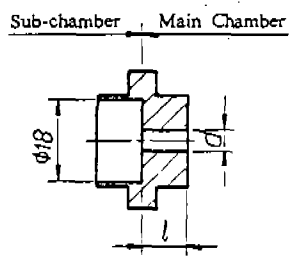
여기서 연락공의 형상은 주실의 중심축 방향으로 분류화염이 분출되도록 한 것(A, E타입), 주실내 혼합기에 선회류가 형성되도록 한 것(B, C 및 D타입) 그리고 부실측의 연락공벽면에서 냉각손실을 감소시켜주기 위한 것(F타입)으로 택하였으며, 연락공의 직경은 A타입의 실험결과에 근거하여 선정하였다(자세한 사항은 실험결과 및 고찰 참조).

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구의 실험결과 분석을 위해 다음과 같이 주실내 압력데이타를 이용한 특성시간을 정의하였다. 압력상승개시시간(t_{p1})은 부실내 혼합기의 점화시점(압력선도상의oms)부터 주실압력이 서서히 상승하기 시작하는 직전과 최대압력상승율($(dP/dt)_{max}$)이 발생한 때의 기울기가 서로 교차되는 점을, 순연소시간 또는 최고 압력도달시간은 부실혼합기의 점화시점부터 주실내 압력이 최고치에 도달한 시간(t_{p2})을, 正味연소기간(τ_p)은 최고압력도달시간과 압력상승개시시간의 차($t_{p2}-t_{p1}$)로 정의한다(Fig. 3 참조).

한편, 분류의 초기분출속도(u_j)는 쉴리렌사진 관찰결과를 이용하여 연락공의 전체길이를 화염이 부실측 연락공 선단부에서 분류가 최초로 주실내로 분출할 때까지 걸리는 시간으로 나누어줌으로서 구하였다.

Table 1 Configuration and specification of the passagehole

Type	A	B	C
Configuration and Specification			
	d=4.7, 5.0, 5.2, 5.4, 5.5 6.0, 9.0, 12.0, 15.0mm	a=0, 5, 10, 15, 20°	a=10, 20, 30°
Type	D	E	F
Configuration and Specification			
	a=10, 15, 20°	n=2(d=6.4mm) n=3(d=5.2mm) n=4(d=4.5mm)	ℓ=1, 5, 10, 15, 20mm d=5.5mm

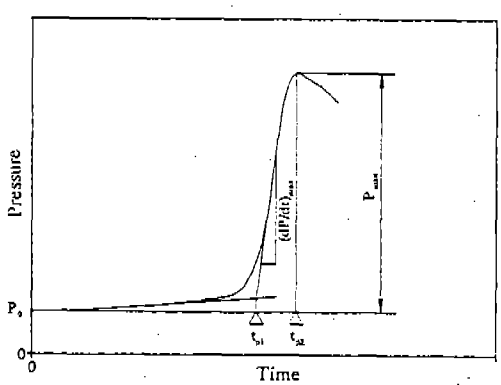


Fig.3 Definition of characteristic times

3.1 연락공의 직경을 변화시킨 경우(Type : A)

연락공의 직경을 4.5mm 보다 작게 할 경우, 부실에서 점화된 혼합기는 연락공벽면의 냉각작용 등으로 인하여 주실내 혼합기에 대한 착화확율이 급격히 저하하기 때문에 연락공의 최소직경(이하 消炎限界로 칭함)은 4.6mm로 하였다(Table 2 참조).

Fig. 4는 연락공의 직경을 4.7mm에서 15mm까지 변화시켰을 때의 연소특성으로, (a)는 주실내 압력선도, (b)는 압력상승율(dP/dt), (c)는 최고연소압력(P_{max}) 및 $(dP/dt)_{max}$, (d)는 t_{p1}, t_{p2}

Table 2 Ignition probability of mixture in a main chamber(case of A type passagehole)

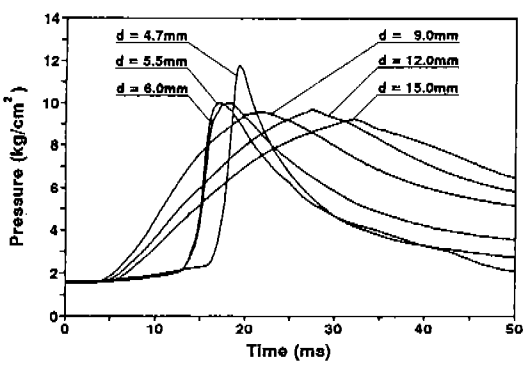
Passagehole diameter (mm)	〈4.0	4.2	4.5	4.6
Ignition probability(%)*	0	5	70	100

* Ignition probability

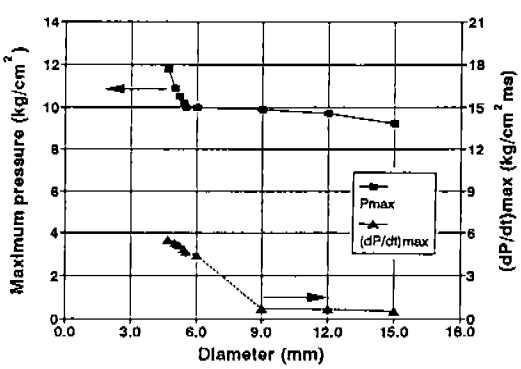
$$=1-\frac{\text{No. of misfire in a main chamber}}{\text{No. of spark ignition trying}}$$

및 u_j를 연락공직경에 대해 나타낸 것이다. 그림 (c) 및 (d)에서와 같이 P_{max}와 t_{p2}가 급변하는 臨界直徑(critical diameter, 대략 d=5.5mm)이 존재하고 있다. 이 임계직경을 기준으로 연락공의 직경이 작은 경우(소염한계~5.5mm)와 연락공의 직경이 큰 경우(〉5.5mm)로 나눠 연소특성을 살펴보면 다음과 같다.

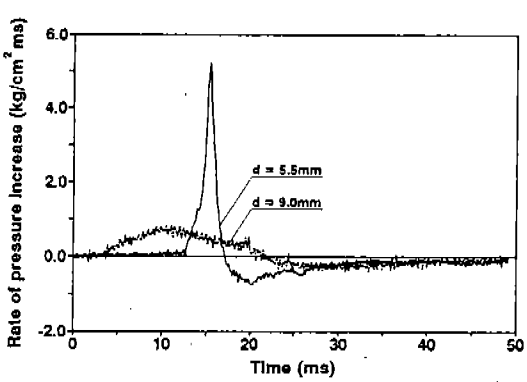
먼저 연락공의 직경이 작은 경우, 주실내 연소압력은 어느정도의 지연시간이 지난 후 급격하게 상승하는 경향을 보이고 있다(Fig. 4의 (a) 및 (b)참조). 이는 분류가 연락공을 지나는 동안 연락공벽면으로의 냉각손실과 고속분류(일례로 d=4.7mm인 경우, u_j=100m/s)에 의한 주실내 미연혼합기 혼합시 야기되는 냉각손실 때문에 주실내 혼합기의 착화가 길어지고 있기 때문이다(일례로 d=4.7mm인 경우, t_{p1}=17.2ms). 그러나 긴 지연시간동안 주실내로 분출된 고속분류의 난류 및 교반작용으로 인하여 화염면이 증가하고 화염대에 있어서 활성분자의 수송과정이 촉진됨으로서 미연혼합기측으로의 에너지전달이 활발하게 되어 일단 연소가 개시된 후에는 연소가 급속히 진행, τ_p가 상당히 짧고(일례로 d=4.7mm인 경우, t_{p2}의 10~20%), $(dP/dt)_{max}$도 커진다(Fig. 4의 (c) 및 (d) 참조).



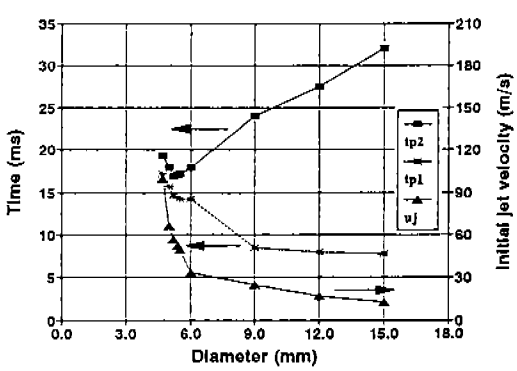
(a) Pressure-time traces



(c) P_{max}, $(dP/dt)_{max}$



(b) Rate of pressure increase



(d) t_{p1}, t_{p2}, u_j

Fig.4 Combustion characteristics of A type

반면, 연락공의 직경이 큰 경우에는 연락공벽면의 냉각손실과 분류의 초기분출속도가 상기의 경우에 비해 상대적으로 작기 때문에 t_{p1}이 단축(일례로 d=12.0mm인 경우, t_{p1}=8.0ms)됨으로서 주실내 착화가 일찍 일어난다. 그러나 분류에 의한 주실내 혼합기에 대한 교반작용이 상대적으로 미약하기 때문에 주실 연소압력의 상승이 완만하고(d=12.0mm인 경우, τ_p도 t_{p2}의 65% 정도로 길어짐), P_{max} 및 $(dP/dt)_{max}$도 낮아지게 된다(Fig. 4의 (c) 및 (d) 참조).

Fig. 5의 (a)와 (b)는 d=5.5mm와 9.0mm인 경우의 화염전파과정을 각각 나타낸 것으로, 사진 숫자위의 *표시는 분류가 주실내로 분출된 초기시간을, **는 압력상승개시시간을, ***는 연소종료시간을 의미한다.

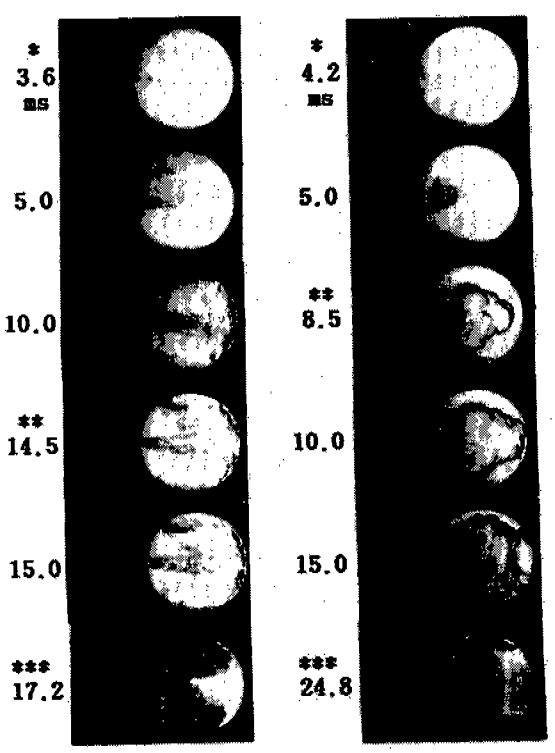


Fig.5 Flame propagation processes of A type

그림에 의하면 점화 직후 부실내 화염은 연락공 직경에 관계없이 약 3.0ms까지 매끈한 화염전면을 갖는 구면상의 층류화염전파를 하고 있다. 그러나 화염이 연락공을 지난 후 주실내에서는 연락공의 직경에 따라 서로 상이한 화염전파형태를 보이고 있다. 즉, 직경이 작은 d=5.5mm인 경우에는, 점화 후 약 3.6ms가 지나 주실내로 분류화염이 분출되고 있지만, 전술한 바와 같이 연락공 통과시 벽면으로의 열손실과 초기분출속도가 50m/s에나 달하는 고속분류의 전단영역에서 생성될 수 있는 작은 스케일의 강한 난류와 격심한 미연혼합기의 혼합에 의한 냉각작용 때문에, 주실내 혼합기가 착화될 때까지는 긴 지연시간(약 10.9ms)이 존재한다. 그러나 긴 지속시간과 큰 운동량을 가진 고속분류는 이 사이에 혼합기를 충분히 교반하여 순환류를 생기게 하고(5~14.5ms), 주실내 전역에 걸쳐서 미세한 스케일의 강한 난류와 연소가스 및 활성화학종[9]을 분산시키기 때문에, 착화후의 연소과정(14.5~17.2ms)은 급격하고, 열손실도 작아 P_{max} 및 $(dP/dt)_{max}$도 큰 값으로 된다. 주 연소방향은 화염분류와 역으로, 주실내에 형성된 순환류에 편승하여 연락공으로 향하고, 연소가스 및 활성화학종이 전역에 걸쳐서 분산되어 폭발적으로 반응하는 소위 초분산 반응대[9](well-dispersed burning zone)와 같은 연소형태를 취한다.

d=9.0mm인 경우에는 초기분출속도가 25m/s로 비교적 낮기 때문에 냉각작용이 상대적으로 작아지게 된다. 그 결과 d=5.5mm인 경우와 달리 주실내 혼합기의 착화는 분류화염의 주실분출직후(4.2ms) 약간의 지연기간(4.3ms)을 거친 뒤 일어난다. 연소과정은 난류에너지의 공급과 교반작용이 미약하기 때문에 주름살형 층류화염(wrinkled laminar flame)으로 분류축에 수직방향으로 전파(5~10ms)되어, 주실벽면에 부딪히고(10ms~)있으며, P_{max}도 연락공직경이 작은 경우에 비해 다소 저하하고 있다.

이상 A타입 연락공의 연소특성을 고려하여 볼 때, 주름살형 층류화염형태를 띠는 직경보다 초분산연소형태를 띠는 임계직경 근방의 연락공이 연소촉진효과에 유리할 것으로 생각된다.

3.2 單孔 연락공의 분출각도를 변화시킨 경우(Type : B)

Fig. 6은 A타입의 연락공중 P_{max} 및 t_{p2}가 급변하는 d=5.5mm인 연락공을 택해, 분류화염의 분출각도(α)를 변화시켰을 때의 압력선도를 나타낸 것이다. 주실의 최고압력은 α=15°까지 α=0°(A타입의 d=5.5mm에 해당)일때에 비해 약간씩 높게 나타나고 있으며, t_{p1}과 t_{p2} 또한 조금씩 단축되는 경향을 보이고 있다. 그러나, 분출각도가 15° 이상이 되면 t_{p1}과 t_{p2}가 지연되고 P_{max}도 낮아진다. 이는 분류의 초기분출속도가 어느 경우에나 50m/s로 동일할 지라도 각도를 가지고 연락공을 통해 분출되는 분류화염이 주실내에 스월 및 난류를 유발시켜 연소를 촉진하기는 하지만, α=15° 이상으로 되면 분류가 주실벽면에 접하는 시간이 길어 도리어 냉각손실이 증가하기 때문이다.

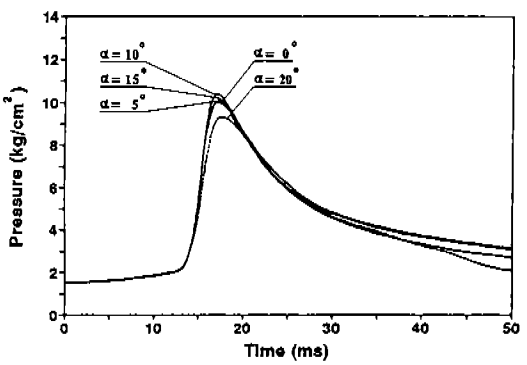
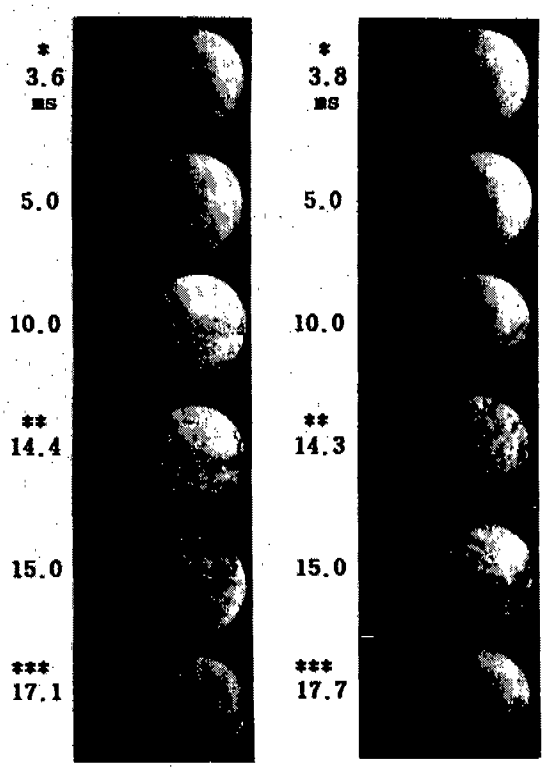


Fig.6 Pressure-time traces of B type



(a) α = 10° (b) α = 20°

Fig.7 Flame propagation processes of B type

Fig. 7의 (a)와 (b)는 α=10°와 α=20°인 경우의 화염전파과정을 나타낸 것으로 부실내에서의 화염전파과정은 모두 동일하게 진행되지만, 주실내로 분출한 이후의 화염전파과정은 연락공의 각도에 따라 상이하게 진행되고 있다. 즉, α=10°인 경우 α=0°(Type A, d=5.5mm)에 비해 분류가 상대적으로 일찍 주실 대향벽면에 부딪혀 난류화염을 형성하기 때문에 연소가 촉진(화염면적이 증가)되어, t_{p1}이 단축되고 P_{max}가 높아지는 것을 알 수 있다. 그러나 분출각도가 α=15° 이상으로 커지면 분류화염의 주실 벽면접촉시간이 길어져 벽면냉각손실이 커지기 때문에 도리어 연소촉진효과가 줄어들어 t_{p1} 및 t_{p2}가 길어지고 P_{max}도 낮아진다. 따라서 연락공의 설치각도를 잘 조정하는 경우 A타입에 비해 다소 연소촉진효과가 있을 것으로 판단되며, B타입의 경우 α=10°가 적정분출각도로 나타났다.

3.3 二孔 연락공의 분출각도를 변화시킨 경우(Type : C, D)

C타입 : C타입은 B타입과 같이 연락공에 분출각도가 있을 경우 보이는 연소촉진효과를 좀 더 확인하기 위하여 d=6.4mm인 연락공 2개(A타입 d=9.0mm 연락공의 유효면적 63.5mm²과 동일)를 하나의 부실측 분류유입구에서 일정각도를 주어 가공한 것이다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 C타입은 연락공 설치각도가 커질수록 압력상승개시시기는 단축되나(α=30°인 경우 t_{p1}=7.2ms,α=10°인 경우 t_{p1}=10.8ms) 최고연소압력은 낮아진다(α=30°인 경

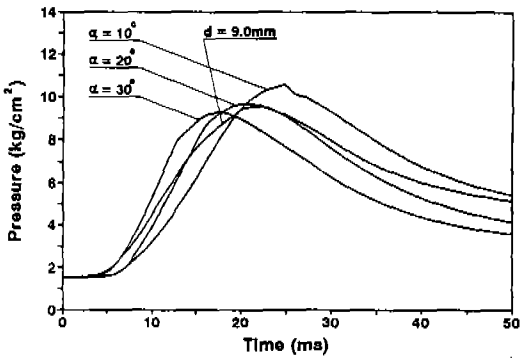


Fig.8 Pressure-time traces of C type

우 P_{max}=9.3kg/㎠, α=10°인 경우 P_{max}=10.5kg/㎠). 이는 Fig. 9의 화염전파사진에서도 알 수 있듯이 연락공 설치각도가 커지면 2개로 분출된 분류화염이 서로 겹쳐지 않고 진행되기 때문에 t_{p1}이 짧아지나 어느정도 시간이 지난 후에는 화염전면이 주실벽면에 접하는 시간이 길게 되어 벽면냉각손실이 커지기 때문에 P_{max}은 낮아지게 되는 것으로 판단된다. 즉, α=10°인 경우의 화염은 층류화염형태로서 전파되어 15.0ms때 주실벽면에 부딪히지만, α=20° 및 30°인 경우에는 8.0ms때 하트(heart) 모양의 화염기둥으로 합쳐져 15.0ms때에는 주실벽면에 더 많이 접하고 있다. 따라서, 연락공 설치각도가 클 수록 연소는 빨리 종료되나, 주실벽면에 접하여 선회류형태로

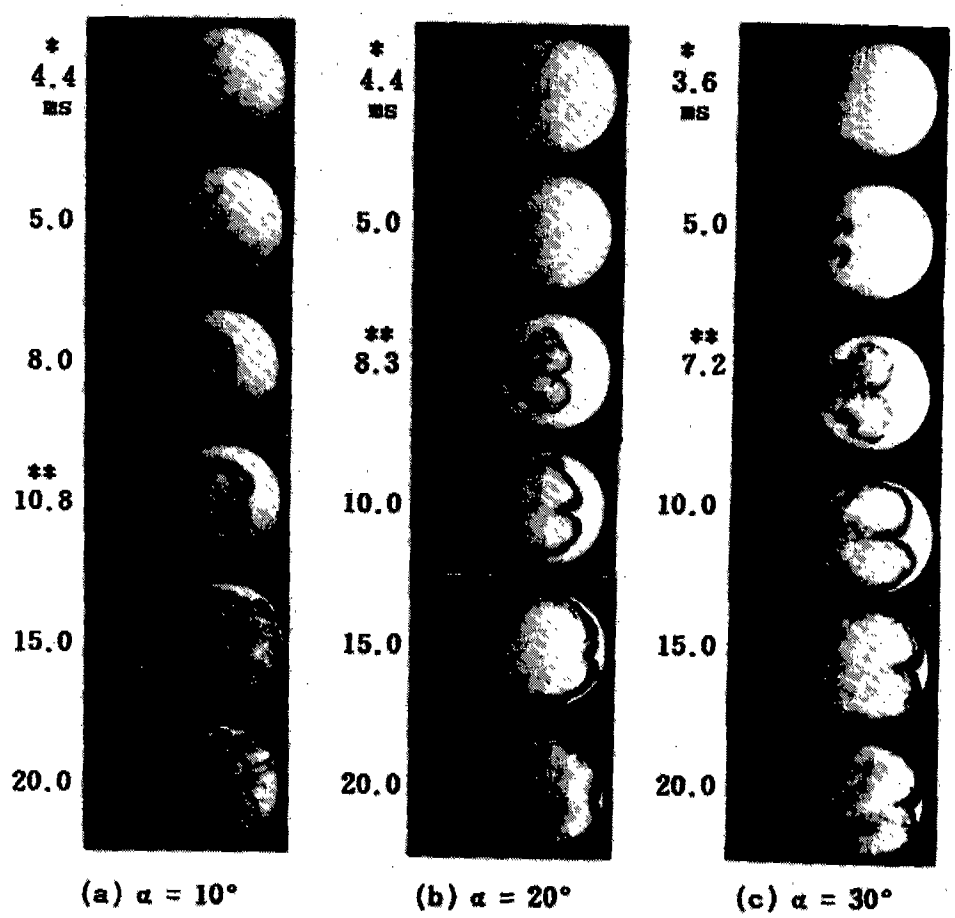


Fig.9 Flame propagation processes of C type

이동하는 시간이 길어지기 때문에 P_{max}은 낮아진다. 이를 A타입의 d=9.0mm인 연락공의 그것과 비교하여 볼 때도 화염면적이 넓고 주실벽면에 접하여 전파하는 시간이 상대적으로 짧아 P_{max}이 약간 높아질 것이라는 것을 알 수 있다.

이상 C타입 연락공의 연소특성을 살펴본 결과, C타입의 P_{max}은 A타입 연락공(d=9.0mm)에 비해 높고 t_{p1} 및 τ_p도 짧아지고 있어, 동일유효면적을 갖는 연락공의 경우 일정분출각도를 줌으로서 연소촉진효과를 얻을 수 있다. 그러나, C타입과 같이 분출각도가 있는 연락공이라 할지라도 연락공의 갯수를 증가시키는 것은 연락공 갯수가 하나인 B타입에 비해 연락공의 단면적이 넓어짐으로서 주실내 혼합기의 조기착화가 발

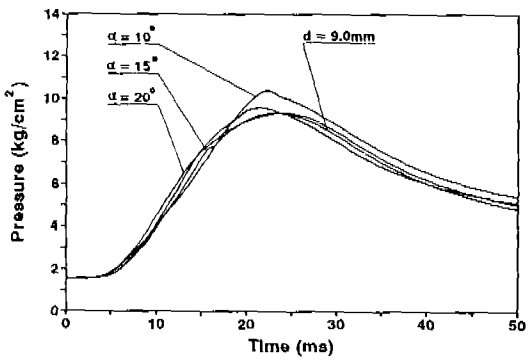


Fig.10 Pressure-time traces of D type

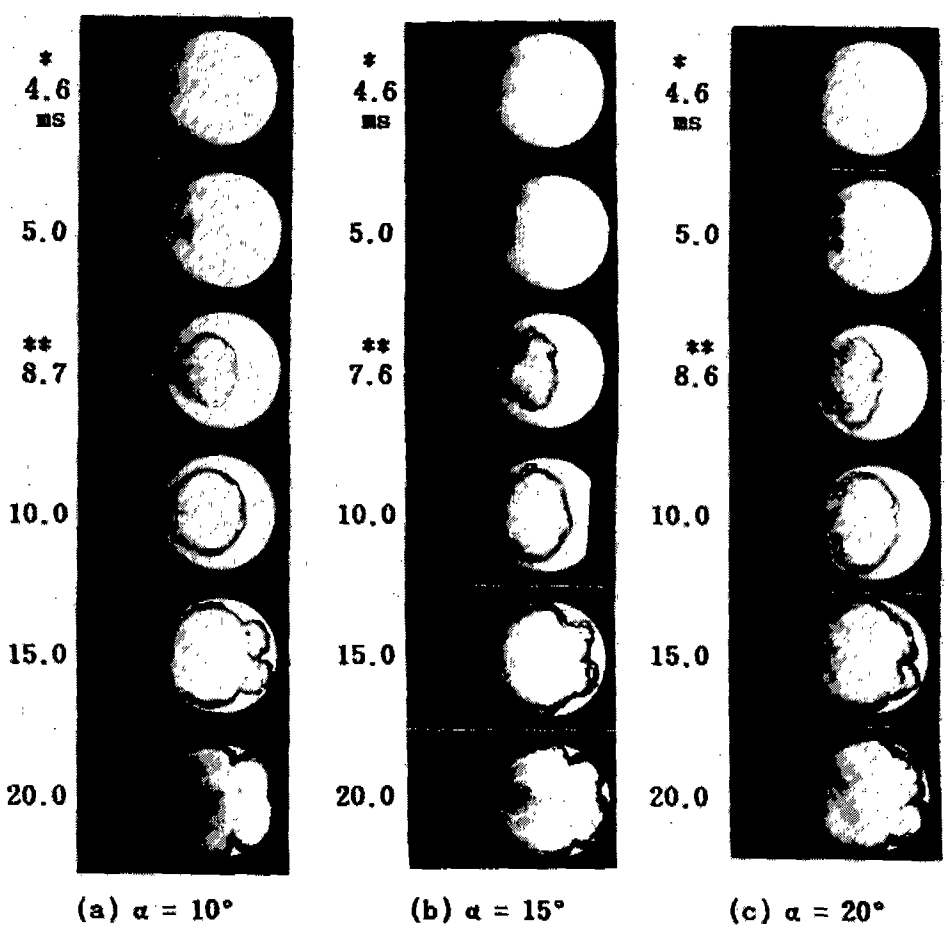


Fig.11 Flame propagation processes of D type

생되기는 하지만 연소시간이 도리어 길어져 급격연소라는 측면에서 바람직하지 못하다는 것을 알 수 있다.

D타입 : D타입도 C타입과 동일한 형상이나 d=6.4mm인 연락공 2개를 부실측 분류유입구에서 겹치지 않고 각각의 유입구가 있게 일정각도를 주어 가공한 것이다.

D타입의 경우 있어서도 연락공설치각도가 커질수록 최고연소압력은 낮아지나(α=30°인 경우 P_{max}=9.3kg/㎠, α=10°인 경우 P_{max}=10.3kg/㎠) t_{p2}는 C타입과 반대로 길어지고 있다(Fig. 10 참조). 이를 C타입의 연소특성들과 비교하여 보면, t_{p1}은 약간씩 당겨지나 τ_p 및 t_{p2}는 길어지고 P_{max} 또한 낮아지고 있어 D타입이 C타입에 비해 연

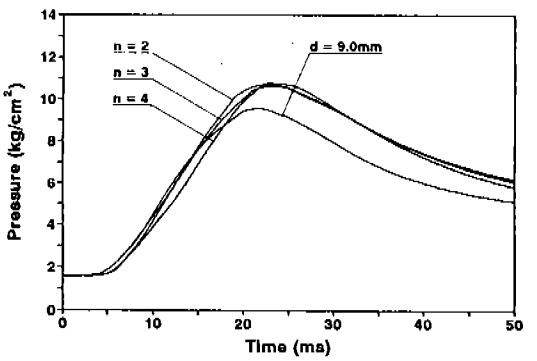


Fig.12 Pressure-time traces of E type

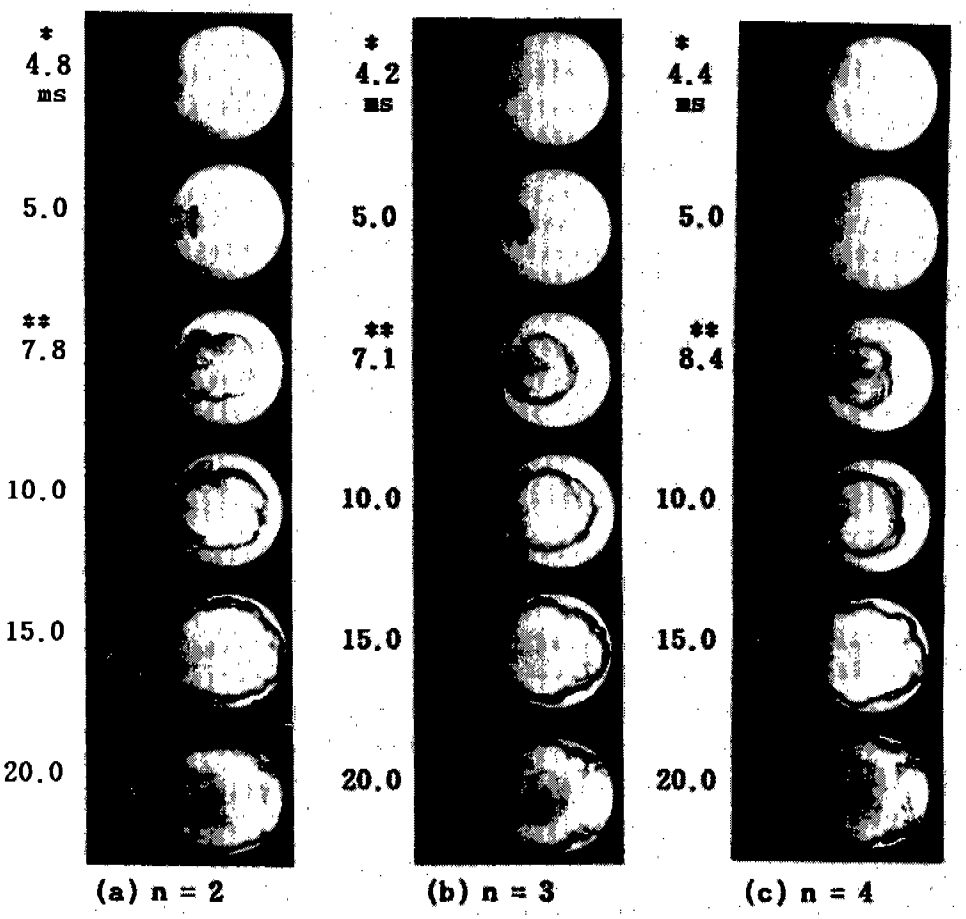


Fig.13 Flame propagation processes of E type

소촉진효과가 약간 떨어짐을 알 수 있다. 이러한 원인으로는 전술한 바와 같이 D타입의 연락공이 각각의 유입구를 갖고 있기 때문에 주실로의 분류분출이 약간 빠른 반면, 주실내에서의 화염전파과정은 C타입의 $\alpha=10°$인 경우와 같이 2개의 분류가 서로 겹쳐진 층류화염형태로 진행하기 때문이다(Fig. 11 참조). 한편, 15.0ms 이후 부실로부터 분출된 분류의 형상이 다시 나타나고 있는 것은 C타입과 달리 각각의 분류유입구를 지난 분류화염의 momentum이 C타입의 경우보다 커서 이것이 화염전면의 형상을 변형시키기 때문인 것으로 판단된다.

이상 C, D타입의 결과를 고려하여 볼 때, 연락공의 갯수를 2개로 증가시키고 주·부실 연결축으로부터 일정각도를 주어 설치해도 결국 연락공의 유효면적이 늘어나기 때문에 B타입과 같은 연소촉진효과를 크게 기대할 수는 없다.

3.4 연락공의 갯수를 변화시킨 경우(Type : E)

E타입은 A타입 연락공의 분출갯수를 변화시킨 경우로서, E-2타입은 A타입에 d=6.4mm인 연락공을 2개, E-3타입은 d=5.2mm인 연락공을 3개, 그리고 E-4는 d=4.5mm인 연락공을 4개씩 주·부실의 중심축과 평행하게 가공한 것이다.

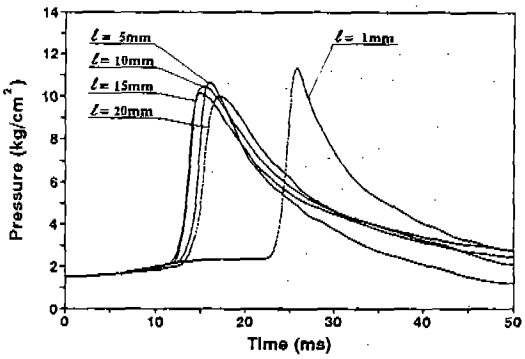
Fig. 12에서 볼 수 있듯이, E타입의 주실내의 P_{max} 및 t_{p2}는 연락공의 분출갯수에 관계없이 거의 비슷하게 나타나며 화염전파과정(Fig. 13 참조) 또는 비슷하다. 그러나 E-2타입의 경우를 연락공의 유효단면적이 같은 A타입의 d=9.0mm인 경우와 비교할 때, 최고압력이 높으며(E-2타입의 경우 $P_{max}=10.8kg/cm^2$, A타입의 경우 $P_{max}=9.88 kg/cm^2$), 전연소시간도 단축되고 있어(E-2타입의 경우 $t_{p2}=22.9ms$, A타입의 경우 $t_{p2}=24.8ms$) 동일한 유효단면적을 가진 연락공이라면 연락공 직경을 작게하고 갯수를 증가시키는 것이 연소촉진효과가 있음을 알 수 있다. 이는 E타입과 A타입(d=9.0mm)의 초기분출속도가 모두 25.0 m/s 정도로 비슷함에도 불구하고 E타입의 화염전파과정이 A타입의 경우와 달리 주실벽면에 충돌하지 않고 전파되어 나가기 때문에 주실벽면의 냉각손실이 작아 P_{max}이 높아진 것으로 생각된다. 이와같은 유추는 A타입 연락공중 주실내 착화확율이 떨어지는 d=4.5mm 연락공을 4개로 증가시키면 주실내 혼합기 착화가 항상 가능하다는 사실로부터도 알 수 있다.

그러나 E타입도 결국 연락공의 유효면적이 늘어나기 때문에 B타입과 같은 연소촉진효과를 크게 기대할 수는 없다.

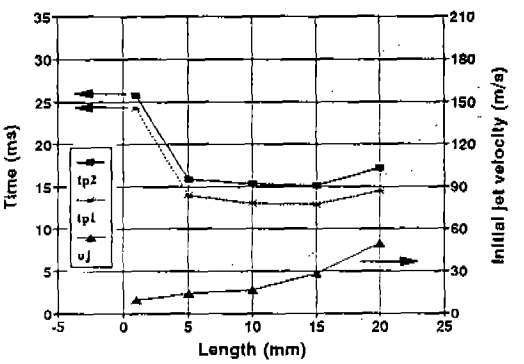
3.5 2차연락공의 길이를 변화시킨 경우 (Type : F)

F타입은 축소단면형상을 갖는 연락공의 영향을 알아보기 위해 부실측의 연락공 직경이 d=18 mm로 일정할 때, d=5.5mm인 주실측의 연락공(이하 2차연락공) 길이를 변화시킨 경우이다. Fig. 14의 (a)에서와 같이 2차연락공길이가 감소할수록 P_{max}은 높아지고 있다. 그러나, t_{p1} 및 t_{p2}는 $\ell=10mm$때가 가장 단축되고 있어 2차연락공 길이에 따른 연소촉진효과가 있음을 알 수 있다 (Fig. 14의 (b)참조). 또한, $\ell=1mm$인 경우에 P_{max}는 가장 높지만, t_{p1} 및 t_{p2}가 상당히 지연되고 있어 오리피스형태를 갖는 연락공의 연소특성은 부실식 가스엔진의 연소촉진에 도움이 없을것으로 판단된다.

Fig. 15의 (a)와 (b)는 $\ell=1$ 및 10mm인 경우에 대한 화염전파과정을 나타낸 것으로, 분류의 초기분출시간 및 화염전파과정은 2차연락공길이에 의해 큰 차이를 보이고 있다. 즉, $\ell=1$ mm인 경우에는 부실내에서 생성된 화염전면이 연락공내에서 오랜시간동안 지체되어 벽면냉각손실이 크기 때문에 주실내의 화염형상이 뚜렷하게 나타나지 않으며 주실내 혼합기의 착화도 상당히 긴 지연시간(18.5ms)을 거친 뒤 급격히 연소되어 있으나, $\ell=10mm$인 경우에는 상대적으로 연락공내에서 화염전면이 지체되는 시간이 짧기 때문에 주실내에서 착화도 빨리 일어나며 t_{p2}도 단축되고 있다. 그러나, F타입의 연소형태는 2차연락공의 길이에 관계없이 주실내 전역에 걸쳐서 분산되어 폭발적으로 반응하는 초분산 반응대를 띠고 있어 지금까지 살펴본 어느 타입보다도 연소촉진효과는 뛰어나다.

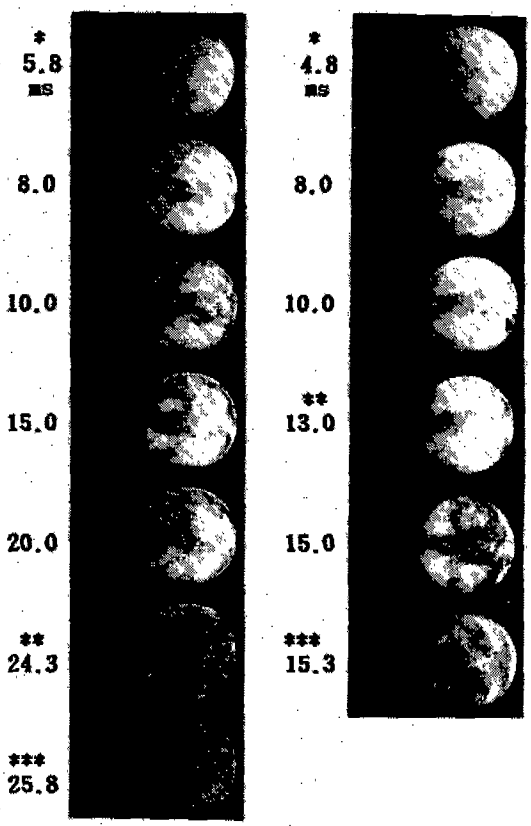


(a) Pressure-time traces



(b) t_{p1}, t_{p2}, u_i

Fig.14 Combustion characteristics of F type



(a) ℓ = 1mm (b) ℓ = 10mm

Fig.15 Flame propagation processes of F type

이상 F타입에 대한 결과를 살펴보면 2차연락공의 길이를 줄여줌으로서 상당한 연소촉진효과를 얻을 수 있으나, ℓ=1mm인 경우에는 착화지연시간이 상당히 길고 최고연소압력이 상당히 높은 점을 고려하여 추후 실제 부실식 가스엔진에 적용시에는 ℓ의 최적화조건을 찾아야 할 필요가 있을 것이다.

3.6 최적형상의 결정

A~F타입의 연락공에 대한 연소특성을 살펴본 결과, 이들 연락공의 기하학적 형상변화에 따라 연소특성은 크게 영향을 받음을 알 수 있었다. 따라서 이들 연락공의 형상변화에 따른 연소촉진효과를 종합적으로 알아보기 위해 연소압력촉진율(α), 연소시간촉진율(β)의 합으로서 나타나는 총연소촉진율(ζ)을 정의하였고,[11] 이들을 상호비교 하였다.

$$\zeta = \alpha + \beta \tag{1}$$

$$\alpha = \frac{P_{max(D)} - P_{max(S)}}{P_{max(S)}} \tag{2}$$

$$\beta = \frac{t_{max(S)} - t_{max(D)}}{t_{max(S)}} \tag{3}$$

여기서 $P_{max(D)}$, $t_{max(D)}$는 부실이 있는 경우의 P_{max}, t_{max}이고, $P_{max(S)}$, $t_{max(S)}$는 부실이 없는 경우의 P_{max}, t_{max}이다.

Fig. 16은 상기 6가지 연락공의 각 타입에 있어서 연소촉진효과가 가장 양호한 경우(A타입

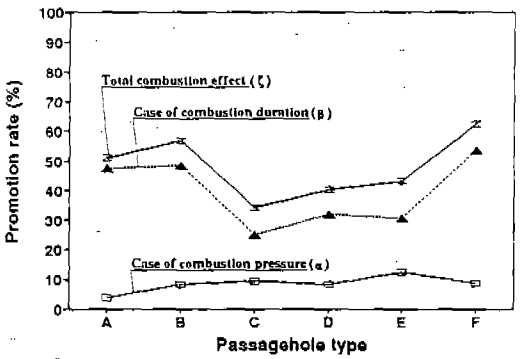


Fig.16 Comparision of combustion promotion rate

d=5.5mm, B타입 α=10°, C타입 α=20°, D타입 α=10°, E타입 n=2, F타입 ℓ=10mm)만을 택하여, α, β 및 ζ에 대해 나타낸 것이다. 그림으로부터도 알 수 있듯이, 모든 타입에 있어서 α는 ζ의 경향을 변화시킬 만큼 큰 값이 아니며, 그 절대값도 β에 비해 작기 때문에 부실식 연소실 내에서의 연소촉진효과는 주로 β가 결정한다고 볼 수 있다.

따라서 총연소촉진율 ζ을 기준으로 하는 경우, 연소촉진효과는 2차연락공길이를 변화시킨 F타입(d=5.5mm, ℓ=10mm)이 가장 뛰어나며, 單孔의 분출각도를 갖는 B타입(d=5.5mm, α=10°), 임계직경을 갖는 A타입(d=5.5mm) 순으로 나타나고 있다.

4. 결 론

부실식 정적연소실을 사용하여 주·부실의 체적비와 당량비가 일정할 때 연락공의 기하학적 형상변화에 따른 주실내 연소특성을 살펴본 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 부실식 정적연소실내의 연소특성은 연락공의 기하학적 형상변화(직경, 분출각도, 갯수 및 2차연락공길이)에 따라 큰 영향을 받으며, F타입, B타입 및 임계직경을 갖는 A타입이 연소촉진에 가장 유리하였다.
2) 연락공직경을 변화시킨 A타입의 경우 연소압력 및 전연소시간이 급변하면서 초분산연소형태를 띠는 직경이 연소촉진에 유리하였다.
3) 연락공에 일정각도를 줌으로서 A타입(임계직경)에 비해 다소 연소촉진효과를 얻을 수 있었으며, α=10°가 적정분출각도로 나타났다.
4) 연소실의 중심축에 대해 대칭으로 분출각도를 갖는 C, D타입 및 분류갯수를 증가시킨 E타입은 동일한 유효단면적을 가진 A타입 연락공에 비해 연소촉진효과가 있었으나, 임계직경을 갖는 A, B타입과 같은 큰 연소촉진효과는 없었다.
5) F타입과 같이 2차연락공 길이는 주실의 연소특성에 크게 영향을 미치며, ℓ=10mm인 경우에 연소촉진효과가 가장 양호하였다.
6) 총연소촉진율 ζ는 연락공의 기하학적 형상이 연소에 미치는 영향을 종합적으로 잘 나타내 줄 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. M. Noguchi, S. Sanda, and N. Nakamura, "Development of Toyota Lean Burn Engine," SAE Paper 760757, 1976.
2. D. Bokura and T. Nakazoro, and T. Furuta, "Research and Development of the YANMAR NHLG Type Pre-chamber Lean Burn Gas Engine," 内燃機關, Vol. 31, No. 387, pp. 87~93, 1992.
3. S. Sanda, T. Inoue, K. Oishi, and T. Yamada, "Combustion Characteristics of Divided Chamber Homogeneous Combustion System," トヨタ技術, Vol. 27, No. 2, pp. 13~24, 1977.
4. E. D. Klomp and G. R. Devoy, "The Effects of Fluid Motions on Combustion in a Prechamber Bomb," SAE Paper 760162, pp. 739~750, 1976.
5. T. Nakahara, "Experimental Study of Flame Propagation in a Divided Combustion Vessel," 法政大學工學部研究集報, No. 12, pp.

19~31, 1976.

6. 정인석, 정경석, 김응서, 조경국, "高速噴出火炎이 燃燒에 미치는 影響에 관한 硏究," 한국자동차공학회지, 제4권 제2호, pp. 13~18, 1982.
7. J. Furukawa and T. Gomi, "Flame-Jet Propagation in a Combustion Vessel," 日本機械學會論文集, Vol. 414, pp. 380~391, 1981.
8. K. Wakai, S. Shimizu, and Y. Oda, "A Study of Combustion Process in a Constant Volume Combustion Chamber with Divided Chamber," 日本機械學會論文集, Vol. 47, No. 417, pp. 872~879, 1981.
9. S. Yamaguchi, N. Ohiwa, and Y. Nishie, "Combustion Mechanism in Prechamber Combustor," 日本機械學會論文集, Vol. 47, No. 419, pp. 1390~1399, 1981.
10. K. Wakai, S. Shimizu, H. Fuma, and H. Taniguchi, "A Study of Combustion Process in a Constant Volume Combustion Chamber with Divided Chamber," 日本機械學會論文集, Vol. 51, No. 465, pp. 1600~1609, 1985.
11. 이상준, 김삼석, 이종태, 이성열, "부실붙이 정적연소실의 연소촉진 효과," 대한기계학회논문집, 제16권 제3호, pp. 569~577, 1992.