

〈論 文〉

## 부실식 정적연소실내 연소특성에 관한 연구(Ⅱ)

임계연락공의 형상변화에 따른 연소촉진효과

김봉석\* · 권철홍\*\* · 류정인\*\*\*

(1993년 4월 13일 접수)

### Combustion Characteristics in a Constant Volume Combustion Chamber with Sub-Chamber (Ⅱ)

Effect of Combustion Promotion with Configuration Change of the Critical Passagehole

Bong-Seock Kim, Chul-Hong Kwon and Jeong-In Ryu

**Key Words :** Combustion Characteristic(연소특성), Sub-Chamber(부실), Geometric Configuration(기하학적 형상), Critical Passagehole(임계연락공), Pressure(압력), Schlieren Photograph(슐리렌사진), Ion and Light Emission Signal(발광 및 이온신호), Combustion Promotion(연소촉진)

#### Abstract

To construct the design back data for a lean-burn gas engine, we investigated the combustion characteristics in the main chamber using a constant volume combustion chamber with sub-chamber. The combustion characteristics with configuration change of the critical passageholes have been studied by taking pressure data, schlieren photograph, ion current and light emission signal of flame. Heat release rate with various critical passageholes also have been analysed by using the combustion model of a prechamber diesel engine. It was found that combustion characteristics in the main combustion chamber were greatly influenced by the geometric configurations of critical passagehole.

### 1. 서 론

최근 내연기관의 연료절약 및 유해배기가스 저감을 위해 회박연소방식이 채택되고 있으나, 회박연소시 화염전파속도가 느리고 연소상태가 불안정하기 때문에 이를 개선하기 위한 여러가지 방안들이 제시되고 있다. 이중 연소실을 2개로 나누고 양실을 노즐이나 연락공 또는 오리피스로 연결하여 점

화촉 연소실로부터 분출되는 화염을 이용, 유해배기가스의 배출을 증대시키지 않고 주실내의 회박혼합기를 안정되고 급속히 연소시키는 부실연소방식이 주목받고 있다.<sup>(1,2)</sup>

부실연소방식에 있어서 주실내 연소특성은 주·부실의 체적비<sup>(3)</sup> 및 당량비,<sup>(4)</sup> 점화위치,<sup>(5)</sup> 부실의 개수,<sup>(6)</sup> 주·부실을 연결하는 통로(이하 연락공이라 칭함)의 직경 및 개수 등과 같은 인자에 의해 영향을 받으며, 이들 인자 중 연락공직경은 주실로 분출하는 분류의 자유선단영역에서 있어서 난류생성 및 혼합작용을 결정하고 주실내의 난류연소를 지배하기 때문에 부실식 정적연소실을 이용한 실험

\*정회원, 한국에너지기술연구소

\*\*한국에너지기술연구소

\*\*\*정회원, 충남대학교 기계공학과

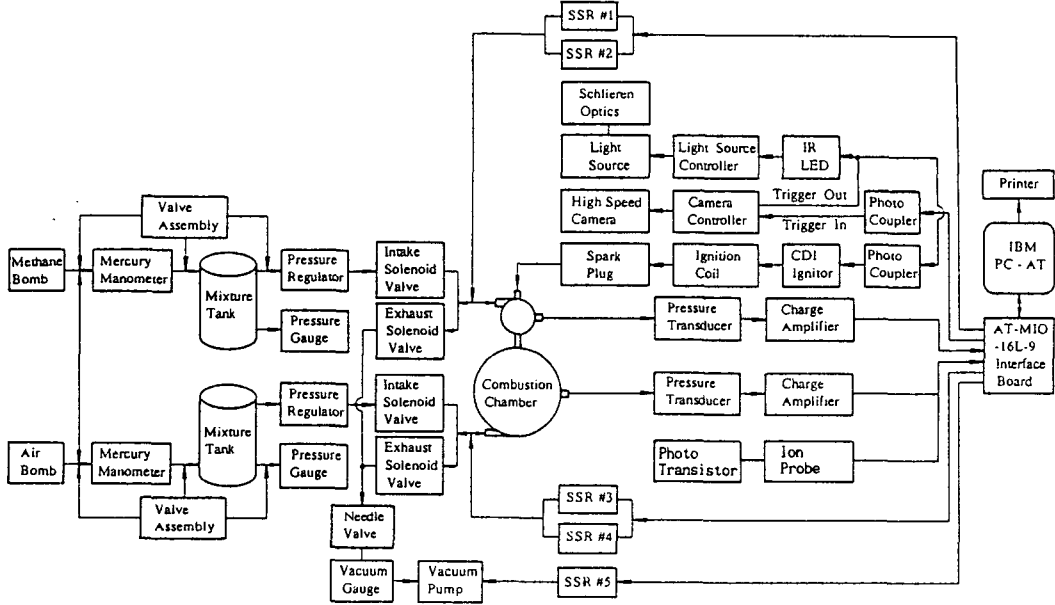


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

의 대부분을 차지하고 있다. (7-11)

따라서 본 연구는 연락공의 형상변화에 따른 연소특성에 관한 연구가 별로 행해지지 않았다는 점에 주목, 먼저 이의 이론적 해석에 앞서서 주·부실의 체적비가 일정한 부실식 정적연소실을 이용하여 주실내 연소압력 및 연소시간에 어떤 경계치가 나타나는 직경(이하 임계직경이라 칭함)을 갖는 연락공의 기하학적 형상을 변화시켰을 때의 연소특성을 조사한 것이다.

연소특성을 조사하기 위해 기본적으로는 연소압력과 쉐리렌사진 관찰결과를 이용하였으며 연소상태의 심층분석을 위해 이온전류파형과 화염발광량 신호를 사용하였다. 또한, 예연소실식 디젤기관의 연소해석 모델에 있어서의 열역학관계식을 이용하여 임계연락공의 형상변화에 따른 열발생율도 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1 은 본 실험장치의 개략도로서 정적연소실, 점화장치, 혼합기 제조장치, 쉐리렌사진 촬영장치, 압력측정장치, 이온전류 및 화염발광량 측정장치, 데이터 수집 및 해석장치로 구성되어 있다.

황동제의 원통형 정적연소실은 직경 80 mm, 깊

이 40 mm 의 주실과 직경 30 mm, 깊이 40 mm 의 부실 그리고 양실을 연결하는 교환가능한 원통형 연락공으로 이루어져 있으며, 주실과 부실의 양 측면에는 화염전파과정을 가시화하기 위해 두께 10 mm 의 관측용 유리창을 설치하였다. (Fig. 2 참조)

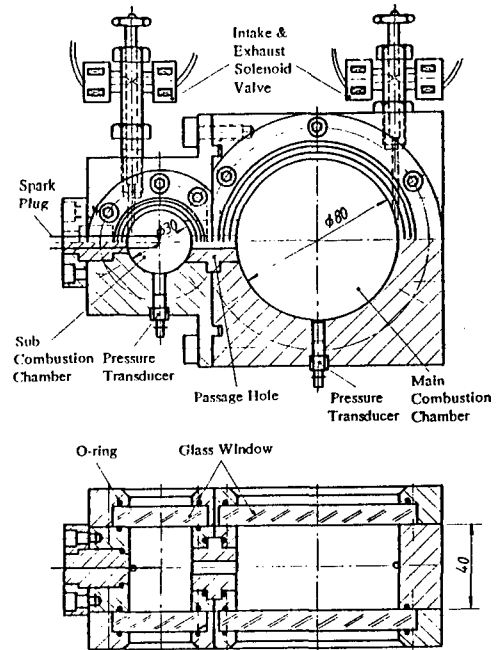


Fig. 2 Combustion chamber

부실내 혼합기를 점화시키기 위해 부실의 중앙에 electrode 직경 1mm, 간극 1mm인 針형의 점화 플러그가 설치되어 있으며, CDI와 자동차용 점화 코일에 의해 방전, 점화된다. 부실상단과 주실하단의 점선부위에는 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.

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

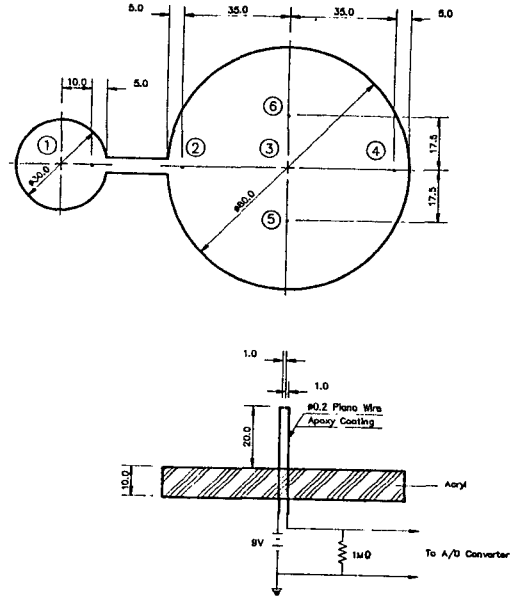
연소실내의 화염전파과정은 Xenon pulse type의 Light source(Cordin Model 359, maximum energy : 1,100 mJ), Schlieren concave mirror(초점거리 1.5 m, 유효직경 250 mm)등으로 구성된 광학시스템으로 가시화하였고, 실리렌사진 촬영에는 Drum형의 16 mm 고속도카메라(Cordin Model 350 F, maximum framing rate : 35,000 FPS)와 ASA 100의 Kodak 제 Tri Plus-X Film을 사용하였다.

연소실내의 압력을 측정하기 위해 주·부실의 중앙측면에 압전식 압력변환기(Kistler Model 601A)를 각각 설치하였으며, 압력변환기의 출력은 증폭기(Kistler Model 5007)를 사용하여 증폭시켰다.

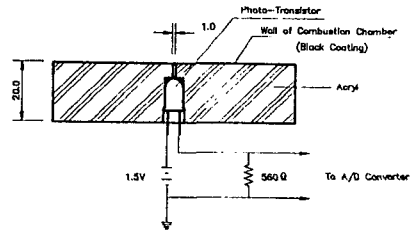
이온전류를 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 아크릴 판에 제작한 간극 1mm, 직경 0.2mm인 한쌍의 피아노강선체의 Ion probe를 주실②~⑥의 위치(Fig. 3의 (a) 참조)에 설치하였다.

화염발광광량신호는 주·부실내 光幅 1.0 mm만의 국소적인 발광을 잡기위해 주실의 Ion probe 대향면위치(②~⑥) 및 부실①의 위치(Fig. 3의 (b) 참조)에 설치된 Phototransistor(FPT 100)로 측정하였으며, Phototransistor의 최대감도파장은 0.8 μm부근으로 Fig. 4와 같은 受光分光感度特性을 가진다.

이들 신호는 압력신호와 같이 A/D Converter(NI Model AT-MIO-16L-9, maximum data acquisition rate : 100 kHz)를 거쳐 컴퓨터로 입력시켜 해석하였다.



(a) Ion sensor



(b) Phototransistor sensor

Fig. 3 Position of ion and phototransistor sensor

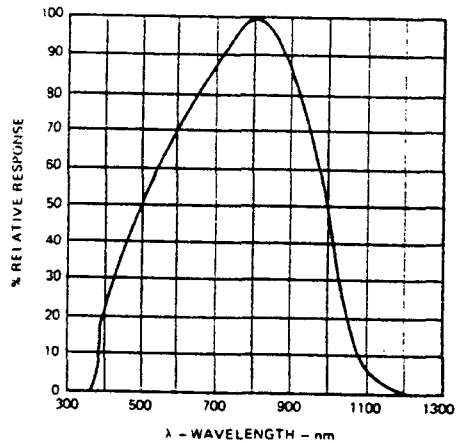


Fig. 4 Spectral characteristics of phototransistor

2.2 실험방법

실험은 혼합기 제조장치에 의해 만들어진 예혼합기를 진공펌프에 의해 진공상태로 미리 소기된 연소실내에 압력 레귤레이터를 통하여 1.5332 kg/cm<sup>2</sup> (실온)의 초기압 상태로 균일하게 충전하고 유동이 거의 정지된 시점(3분 후)에서 실험을 시작하였다. 쉐리펜사진 촬영시에는 고속카메라의 shutter open signal을 동기신호로, 이외의 경우에는 컴퓨터의 트리거신호를 동기신호로 사용하였으며, 혼합기의 당량비는 주·부실 모두 1.0이다.

Table 1은 실험에 사용된 6종의 연락공 형상 및 치수를 나타낸 것으로, 모든 연락공의 전체길이는 20 mm이다. 연락공은 직경, 각도, 2차연락공 길이 및 보조연락공 설치여부에 따라 구분하였다.

3. 열발생률 계산 및 연소압력 특성시간

3.1 열발생률의 계산방법

본 연구에서의 열발생률 계산모델은 기본적으로 예연소실식 디젤기관 연소해석 모델에 있어서의 열역학관계식<sup>(12)</sup>을 이용하였다. 즉 주·부실 각각에 대해 상태방정식과 에너지방정식을 세우고 양실간 연락공을 통한 유량이동에 대한 연속방정식과 유량방정식을 세워 차분법에 의해 해석하였으며, 열발생률 계산을 위한 기초식은 다음과 같다.

$$\text{주실의 상태방정식 : } P_m V_m = G_m R_m T_m \quad (1)$$

$$\text{부실의 상태방정식 : } P_s V_s = G_s R_s T_s \quad (2)$$

Table 1 Configuration and specification of the passagehole

Type	A	B	C
Configuration and Specification	Sub-chamber, Main chamber 	Sub-chamber, Main chamber 	Sub-chamber, Main chamber 
	d=4.7, 5.0, 5.2, 5.4, 5.5, 6.0, 9.0, 12.0, 15.0 mm	d=5.5 mm alpha=0, 5, 10, 15, 20°	d=5.5 mm l=0, 5, 10, 15, 20 mm
Type	D	E	F
Configuration and Specification	Sub-chamber, Main chamber 	Sub-chamber, Main chamber 	Sub-chamber, Main chamber 
	d=5.5 mm l=1, 5, 10, 15, 20 mm	d=5.5 mm alpha=10° l=1, 5, 10, 15, 20 mm	d=1.0, 5.5 mm, alpha=10° l=1, 5, 10, 15, 20 mm

$$\text{연속방정식} \quad : \left. \begin{aligned} G_m + G_s &= G_{m0} + G_{s0} = G_0 \\ dG_m/dt &= -dG_s/dt \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$P_m > P_s$  일때

$$\begin{aligned} \text{주실의 에너지식} : C_p m T_m dG_m + dQ_m + AdE_{ms} \\ = d(G_m C_v m T_m) + AP_m dV_m \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{부실의 에너지식} : C_p m T_m dG_s + dQ_s + AdE_{ms} \\ = d(G_s C_v s T_s) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{유량방정식} \quad : dG_s = \mu_{ms} f \psi_{ms} \sqrt{2P_m/V_m} dt \quad (6)$$

$$\text{단, } \frac{P_s}{P_m} \geq \left(\frac{2}{\chi_m + 1}\right)^{\kappa_m/(\kappa_m - 1)} \text{ 일때,}$$

$$\varphi_{ms} = \sqrt{\left(\frac{\chi_m}{\chi_m - 1}\right) \left[ \left(\frac{P_s}{P_m}\right)^{2/\kappa_m} - \left(\frac{P_s}{P_m}\right)^{(\kappa_m + 1)/\kappa_m} \right]} \quad (7)$$

$$\frac{P_s}{P_m} < \left(\frac{2}{\chi_m + 1}\right)^{\kappa_m/(\kappa_m - 1)} \text{ 일때,}$$

$$\psi_{ms} = \left(\frac{2}{\chi_m + 1}\right)^{\kappa_m/(\kappa_m - 1)} \sqrt{\frac{\chi_m}{\chi_m + 1}} \quad (8)$$

$P_m < P_s$  일때

$$\begin{aligned} \text{주실의 에너지식} : C_p m T_m dG_m + dQ_m + AdE_{sm} \\ = d(G_m C_v m T_m) + AP_m dV_m \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{부실의 에너지식} : C_p m T_m dG_s + dQ_s + AdE_{sm} \\ = d(G_s C_v s T_s) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{유량방정식} \quad : dG_m = \mu_{sm} f \psi_{sm} \sqrt{2P_s/V_s} dt \quad (11)$$

$$\text{단, } \frac{P_m}{P_s} \geq \left(\frac{2}{\chi_s + 1}\right)^{\kappa_s/(\kappa_s - 1)} \text{ 일때,}$$

$$\psi_{sm} = \sqrt{\left(\frac{\chi_s}{\chi_s - 1}\right) \left[ \left(\frac{P_m}{P_s}\right)^{2/\kappa_s} - \left(\frac{P_m}{P_s}\right)^{(\kappa_s + 1)/\kappa_s} \right]} \quad (12)$$

$$\frac{P_m}{P_s} < \left(\frac{2}{\chi_s + 1}\right)^{\kappa_s/(\kappa_s - 1)} \text{ 일 때,}$$

$$\psi_{sm} = \left(\frac{2}{\chi_s + 1}\right)^{\kappa_s/(\kappa_s - 1)} \sqrt{\frac{\chi_s}{\chi_s + 1}} \quad (13)$$

여기서 기호  $P$ 는 연소실내의 압력,  $V$ 는 연소실의 체적,  $G$ 는 가스중량,  $R$ 은 가스상수,  $T$ 는 연소실내의 온도,  $C_v$  및  $C_p$ 는 정적 및 정압비열,  $Q$ 는 열량,  $E$ 는 운동량,  $f$ 는 연락공의 단면적,  $\mu$ 는 유량계수,  $\chi$ 는 비열비, 그리고 하첨자  $m$ 은 주실,  $s$ 는 부실,  $0$ 는 초기상태를 각각 나타낸다.

### 3.2 연소압력 특성시간

임계연락공의 형상변화에 따른 연소특성을 분석하기 위해 다음과 같이 연소압력 데이터에 의한 특성시간을 정의하였다. 압력상승 개시시간(initial time of pressure increase)  $t_{p1}$ 은 부실혼합기의 점화시점(압력선도상의  $0ms$ )부터 주실압력이 서서히 상승하기 시작하는 직선과 최대압력상승율( $dP/dt$ )

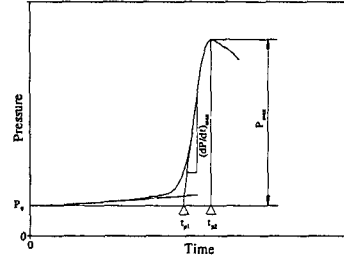


Fig. 5 Definition of characteristic times

$\max$ )이 발생한 때의 기울기가 서로 교차되는 점까지의 시간으로, 전연소시간(total burning time) 또는 최고 압력도달시간  $t_{p2}$ 는 부실혼합기의 점화시점부터 주실내 압력이 최고치에 도달한 시간으로, 정미연소시간(net burning time)  $\tau_b$ 는 최고 압력도달시간과 압력상승 개시시간의 차( $t_{p2} - t_{p1}$ )로 정의한다. (Fig. 5 참조)

## 4. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 먼저 연락공 직경크기가 연소에 미치는 영향을 압력, 열리렌사진, 이온전류 및 화염발광량신호 등의 데이터에 의해 고찰한 후, 이들 중에서 연소특성에 변화 또는 연소촉진효과가 있는 임계직경을 택하여 이의 형상변화에 따른 연소특성을 분석하기로 한다. 한편, 본 실험은 어느정도의 편차를 수반하기 때문에 동일조건에서 10회 이상 실험을 행하고 그 평균치를 측정했으며, 분류의 초기분출속도( $u_s$ )는 열리렌사진 관찰결과를 이용하여 연락공의 전체길이를 화염이 부실측 연락공 선단부에서 분류가 최초로 주실내로 분출할 때까지 걸리는 시간으로 나누어줌으로써 구하였다.

### 4.1 임계직경을 갖는 연락공

Fig. 6은 연락공의 직경  $d$ 를 4.7mm부터 15mm까지 변화시켰을 때의 연소특성을 나타낸 것이다. Fig. 6의 (a), (b)에서 볼 수 있듯이 최고연소압력( $P_{max}$ )은 소염한계에서부터 직경이 커질수록 급격히 감소하다가  $d=5.5mm$ 를 기준으로 완만하게 감소하고 있으며, 전연소시간은 직경이 커질수록 급격히 감소하다가  $d=5.5mm$ 를 기준으로 다시 증가하고 있다.

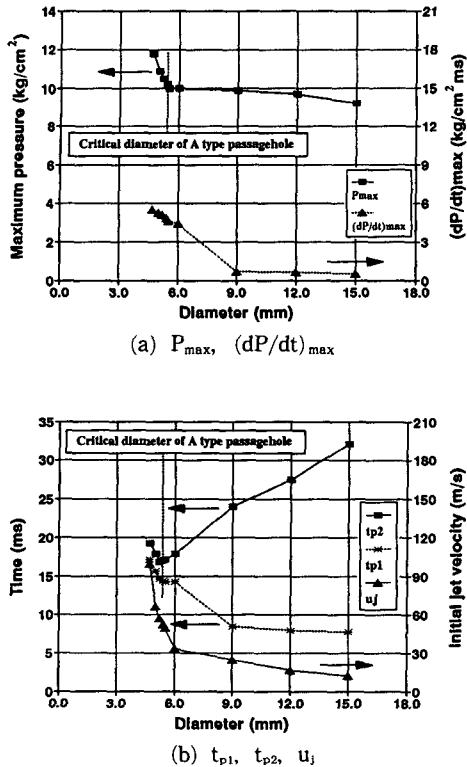


Fig. 6 Combustion characteristics of type A

이러한 원인으로서는 연락공이 임계직경 이하인 경우, 분류가 연락공을 지나는 동안 연락공벽면으로의 냉각손실과 고속분류(일례로  $d=4.7$  mm인 경우, 초기 분출속도( $u_j$ )=100 m/s)에 의한 주실내 미연혼합기 혼합사 야기되는 냉각손실로 인해 주실내 혼합기의 착화가 길어지나(일례로  $d=4.7$  mm인 경우,  $t_{p1}=17.2$  ms), 긴 지연시간동안 주실내로 분출된 고속분류의 난류 및 교반작용으로 인하여 미연혼합기측으로의 에너지전달이 활발하게 되어 일단 착화된 후에는 연소가 급속히 진행되기 때문에 연소압력은 급격히 상승하게 된다.

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

다. 따라서, 주실내의 연소특성도 이 임계직경을 경계로 하여 변화할 것임을 알 수 있다.

Fig. 7은 임계직경을 기준으로 세가지 직경크기( $d=5.5, 9.0$  및  $15.0$  mm)에 있어서의 화염전파 과정을 나타낸 것으로, 사진 숫자위의 \* 표시는 분류가 주실내로 분출된 초기시간을, \*\*는 착화시점을, \*\*\*는 연소 종료시간을 의미한다.

그림에 의하면 점화 직후 주실내 화염은 연락공 직경에 관계없이 약 3.0 ms까지 매끈한 화염전면을 갖는 구면상의 층류화염전파를 하고 있다. 그러나 화염이 연락공을 지난 후 주실내에서는 연락공의 직경에 따라 서로 상이한 화염전파형태를 보이고 있다. 즉, 임계직경  $d=5.5$  mm인 경우에는 점화후 약 3.6 ms가 지나 주실내로 분류화염이 분출되고 있지만, 전술한 바와 같이 연락공 통과시 벽면으로의 열손실과 초기 분출속도가 50 m/s에나 달하는 고속분류의 전단영역에서 생성될 수 있는 작은 스케일의 강한 난류와 격심한 미연혼합기의 혼합에 의한 냉각작용 때문에, 주실내 혼합기가 착화될 때까지는 긴 지연시간(약 8.7 ms)이 존재한다. 그러나 긴 지속시간과 큰 운동량을 가진 고속분류는 이 사이에 혼합기를 충분히 교반하여 순환류를 생기게 하고(5~12.3 ms), 주실내 전역에 걸쳐서 미세한 스케일의 강한 난류와 연소가스 및 활성화화종<sup>9)</sup>을 분산시키기 때문에, 착화 후의 연소과정(12.3~17.2 ms)은 급격하고, 열손실도 작아  $P_{max}$  및  $(dP/dt)_{max}$ 도 큰 값으로 된다. 주 연소방향은 분류화염과 역으로, 주실내에 형성된 순환류에 편승하여 연락공으로 향하고, 연소가스 및 활성화화종이 전역에 걸쳐서 분산되어 폭발적으로 반응하는 소위 초분산반응대<sup>9)</sup>(well-dispersed burning zone)<sup>9)</sup>와 같은 연소형태를 취한다.

$d=9.0$  mm인 경우에는 초기 분출속도가 25 m/s로 비교적 낮기 때문에 냉각작용이 상대적으로 작아지게 된다. 그 결과  $d=5.5$  mm인 경우와 달리 주실내 혼합기의 착화는 분류화염의 주실 분출 직후(4.2 ms) 약간의 지연시간(3.0 ms)을 거친 뒤 일어난다. 연소과정은 난류에너지의 공급과 교반작용이 미약하기 때문에 주름살형 층류화염(wrinkled laminar flame)으로 분류측에 수직방향으로 전파(5~10 ms)되어, 주실벽면에 부딪히고(10 ms~)있으며,  $P_{max}$ 도 연락공직경이 작은 경우에 비해 다소 저하하고 있다.

$d=15.0$  mm인 경우, 분류는 그 경계가 명확한

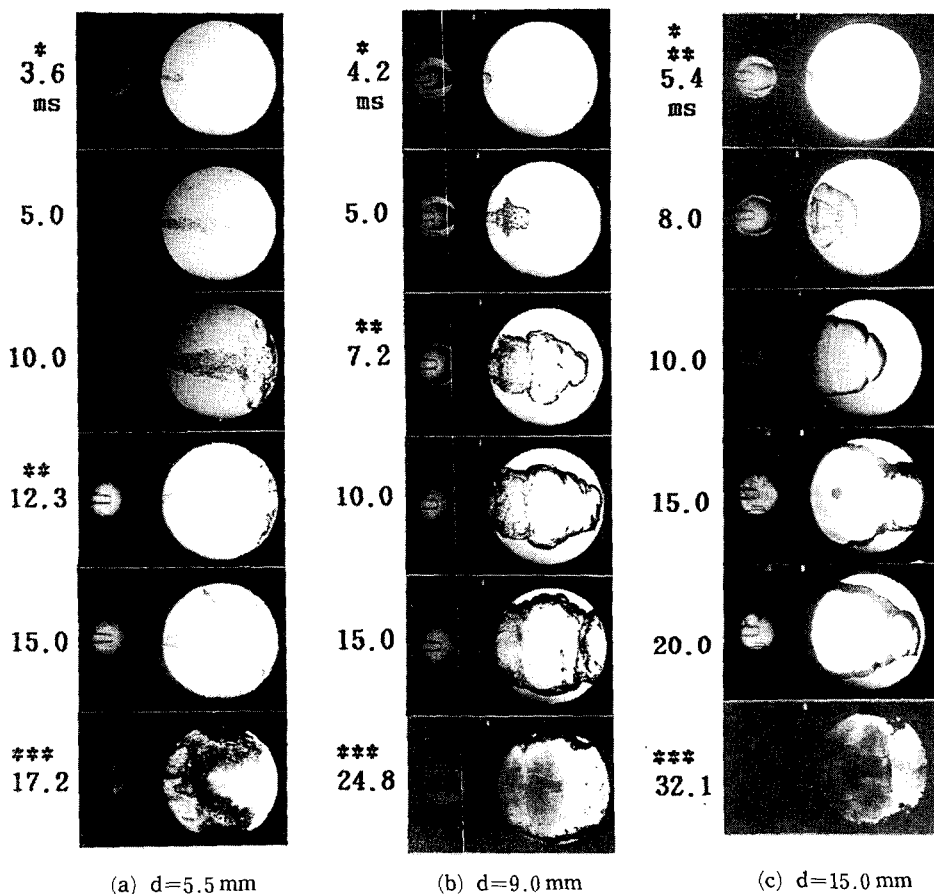


Fig. 7 Flame propagation processes of type A

화염면을 갖는 화염기둥으로서 분출되며(5.4 ms), 주실내 혼합기는 이 화염면에 의해 착화된다. 초기 분출속도가 12.5 m/s로 낮기 때문에 착화 후 화염기둥은 버섯형태(6~8 ms)로 성장한다. 그 후 화염면 전체의 곡률은 거의 변하지 않고 큰 스케일의 구면형 층류화염(spherical laminar flame)으로 분류축방향 및 수직인방향으로 진행(10 ms~)되며,  $P_{max}$  또한  $d=9.0$  mm 인 경우와 거의 비슷한 값으로 된다.

이상과 같이 연락공직경에 따라 주실내 화염전파는 초분산연소( $d=4.7\sim 6.0$  mm), 주름살형 층류연소( $d=9.0\sim 12.0$  mm) 및 구면형 층류연소( $d=15.0$  mm) 등으로 대별된다.

한편, 상기  $d=5.5$ mm일때는  $d=9.0$  또는 15.0mm 일때와 달리 연소압력 및 화염전파사진 만으로는 주실내 혼합기의 착화시점 및 위치를 확인하기 어렵기 때문에 다른 제신호들과 종합하여 판단할 필

요가 있다.

Fig. 8은  $d=5.5$ mm일때의 주실내 연소압력( $P_m$ ), 이온전류 및 화염발광광신호를 각각 나타낸 것이다. 이온전류형의 최대값은 ④→③→⑤, ⑥→② 순으로 발생되고 있으며, ② 위치의 이온전류파형은 분류의 분출직후와 주실연소압력이 급격히 상승할 때 꽤 높은 주파수로 그리고 ③ 위치의 이온전류파형도 분류의 분출직후에 낮은 주파수와 주실연소압력이 급격히 상승할 때 꽤 높은 주파수로 각각 나타나고 있다. 이는 분류가 연락공 통과시 냉각작용 때문에 명확한 화염핵을 수반하지 못하고 열이 있는 연소가스와 활성화학종으로 이루어진 분류로서 분출되어 긴 지연시간을 거친 후 급격히 착화되기 때문이다.

이와같은 현상은 대향면에 설치한 Phototransistor의 화염발광광신호로부터도 확인할 수 있다. 2.8 ms 때 부실내 ① 위치를 지난 화염은 이온전류

파형과 달리 분류의 분출직후 ② 위치에서 화염발광량 신호가 없이 긴 지연시간을 거친 후 주실후미 벽면근방 12.3 ms 때부터 ④ → ③ → ⑤, ⑥ → ② 순 (Fig. 8 참조)으로 신호가 나타나고 있다.

주실내 5개의 Phototransistor 중 ③ 위치의 화염발광량 신호가 가장 높고 급격히 나타나는 것은 주실 중심부의 연소온도가 가장 높고 휘도가 밝기 때문이며, 그 절대값은 주실 연소압력신호보다 작지만 주실내 연소압력의 신호패턴을 보여주고 있어 주실 중심부의 화염발광량신호와 주실 연소압력이 서로 밀접한 관계가 있음을 생각할 수 있다. 상기와 같은 주실내 착화현상은 대체로 초기분출속도가 빠른 소염한계직경에서 임계직경을 갖는 연락공에

서 나타나고 있으며, 연소축진효과도 이 범위내에서 가장 양호하다.

그러나,  $d=9.0$  mm 인 경우에 이온전류파형의 최대값은 분류의 진행방향인 ② → ③ → ⑤, ⑥ → ④ 순으로 나타나며 그 값들도 점차 작아지고 있다. 이때의 화염발광량 신호도 7.4 ms 때부터 ② → ③ → ⑤, ⑥ → ④ 순으로 나타나며, ②, ③ 위치에서 거의 동시에 발생되고 있는 점으로 미루어 보아 주실내 혼합기의 착화는 분류의 주실분출 직후 약간의 지연기간(3.0 ms)을 거친 뒤 일어남을 알 수 있다. (Fig. 9 참조)

$d=15.0$  mm 인 경우에 이온전류파형 및 화염발광량신호는 대체로  $d=9.0$  mm 인 경우와 비슷하게 분류의 진행방향인 ② → ③ → ⑤, ⑥ → ④ 순으로 나타나며 주실내 혼합기착화도 지연시간이 없이 분출되는 분류에 의해 바로 이루어지고 있다. (Fig. 10 참조)

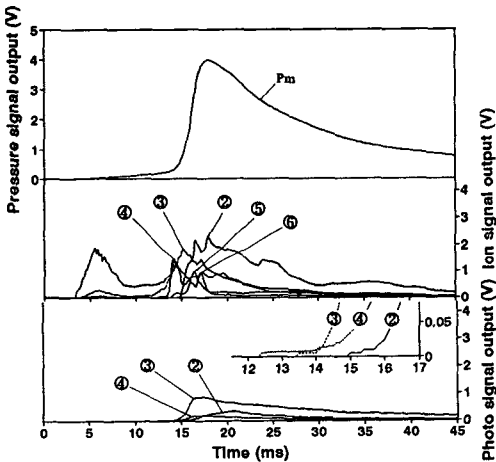


Fig. 8 Ion and photo signal output of type A ( $d=5.5$  mm)

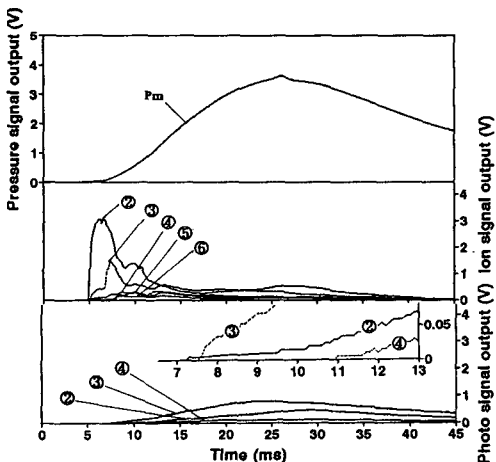


Fig. 9 Ion and photo signal output of type A ( $d=9.0$  mm)

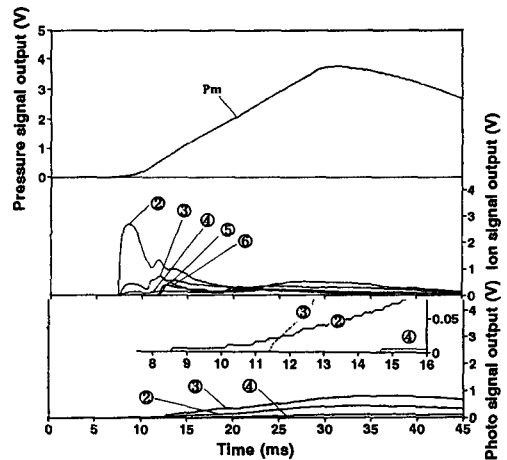


Fig. 10 Ion and photo signal output of type A ( $d=15.0$  mm)

Fig. 11 은 이때의 열발생률 선도를 나타낸 것으로  $d=5.5$  mm 인 경우, 주실의 열발생률( $dQ_m/dt$ )은 주실내 혼합기가 착화한 순간(12.3 ms)부터 연소가 종료되는 시점 (17.2 ms)까지 짧은 시간에 급격히 커지고 있으며, 그 절대값도 직경이 큰 경우에 비해 상대적으로 크다. 반면 연락공직경이 큰 예인  $d=9.0, 15.0$  mm 인 경우, 주·부실 열발생률의 절대값이 작고 긴 시간( $d=9.0$  mm 인 경우 0~24.8 ms,  $d=15.0$  mm 인 경우 0~32.1 ms)에 걸쳐 발생하고 있어  $d=5.5$  mm 인 경우에 비해 연소축진효과가 떨어짐을 알 수 있다.



이상 직경크기에 따른 연소특성을 살펴본 결과, 연소압력 및 시간에 경계가 있고 초분산연소형태를 띠는 임계직경의 경우가 연소촉진효과가 있었으며 열발생률도 급격하게 나타났다.

4.2 연락공의 각도를 변화시킨 경우(B 타입)

Fig. 12의 (a)와 (b)는 임계직경을 갖는 A 타입 연락공의 설치각도( $\alpha$ )를 변화시켰을 때의 압력선

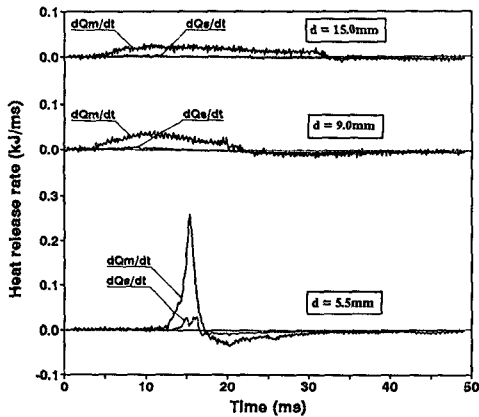
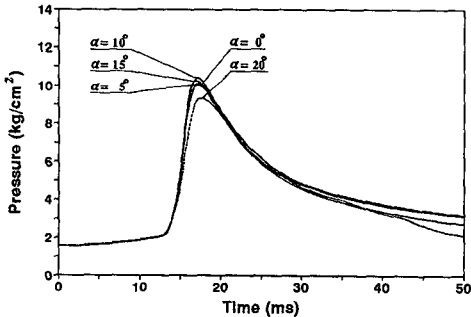
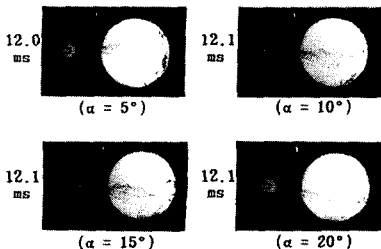


Fig. 11 Heat release rate of type A



(a) Pressure-time traces



(b) Flame propagation processes

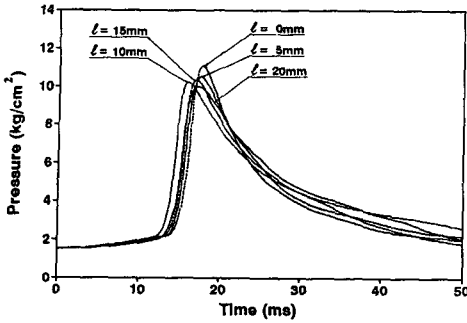
Fig. 12 Pressure-time traces and flame propagation processes of type B

도 및 착화시점의 화염전파사진을 나타낸 것이다. 주실의 최대압력은  $\alpha=15^\circ$ 까지  $\alpha=0^\circ$ (A 타입의  $d=5.5\text{ mm}$ 에 해당)일때에 비해 약간씩 높게 나타나고 있으며,  $t_{p1}$ 과  $t_{p2}$  또한 조금씩 단축되는 경향을 보이고 있다. 그러나, 분출각도가  $15^\circ$  이상이 되면  $t_{p1}$ 과  $t_{p2}$ 가 지연되고  $P_{\max}$ 도 낮아진다. 이는 분류의 초기 분출속도가 어느 경우나 50 m/s로 동일할 지라도 각도를 가지고 연락공을 통해 분출되는 분류화염은  $\alpha=0^\circ$ 에 비해 상대적으로 일찍 주실후미 벽면에 부딪혀 스윙 및 난류화염을 형성하기 때문에 연소가 촉진(화염면적이 증가)되어,  $t_{p1}$ 이 단축되고  $P_{\max}$ 가 높아진다. 그러나 분출각도가  $\alpha=15^\circ$ 이상으로 커지면 분류화염의 주실벽면 접촉 시간이 길어져 벽면냉각손실이 커지기 때문에 도리어 연소촉진효과가 줄어들어  $t_{p1}$  및  $t_{p2}$ 가 길어지고  $P_{\max}$ 도 낮아진다. 따라서 연락공의 설치각도를 잘 조정하는 경우 A 타입에 비해 다소 연소촉진효과가 있을 것으로 판단되며, B 타입의 경우  $\alpha=10^\circ$ 가 적정분출각도로 나타났다. 이때의 열발생률선도, 이온전류파형 및 화염발광량신호의 형태는 임계직경을 갖는 A 타입( $d=5.5\text{ mm}$ )의 그것들과 비슷하다.

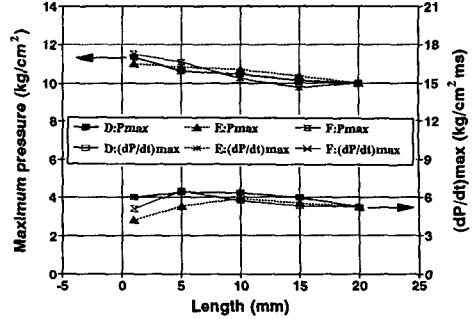
4.3 연락공의 형상 및 2차연락공길이를 변화시킨 경우(C, D, E, F 타입)

C, D, E 및 F 타입은 임계직경을 갖는 A, B 타입의 연락공벽면 냉각손실을 감소시키기 위해 A 타입의 부실측 연락공 형상과 주실측 연락공(이하 2차연락공이라 칭함)의 길이, 각도, 보조연락공 등을 변화시킨 경우이다.

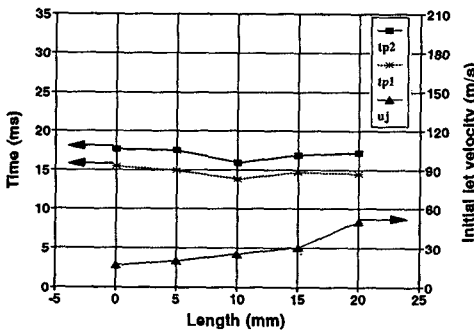
C 타입 : Fig. 13은 부실측 연락공의 형상이 원뿔형인 C 타입의 연소실내 특성변화를 나타낸 것으로, 그림에서 알 수 있듯이 2차연락공길이가 길어질수록  $P_{\max}$  및  $(dP/dt)_{\max}$ 은 낮아지고  $t_{p1}$  및  $t_{p2}$ 이 단축되고 있다. 이는 2차연락공길이  $l$ 이 길어질수록 분류화염이 주실내로 고속으로 분출( $l=20\text{ mm}$ 일때  $u_j=50\text{ m/s}$ ,  $l=0\text{ mm}$ 일때  $u_j=16.7\text{ m/s}$ )되어 주실내 착화자체는 일찍 일어나지만, 분류화염이 연락공을 통과할때 벽면으로 보다 많은 열을 빼앗기고 고속분류 전단영역에서의 작은 스케일의 강한 난류와 미연혼합기와의 혼합에 따른 냉각작용 등으로 연소촉진이 늦어지기 때문인 것으로 생각된다. 그러나, 이들 2차연락공길이를 변화시킨 C 타입의 연소촉진효과는 임계직경을 갖는 A 타입보다



(a) Pressure-time traces



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

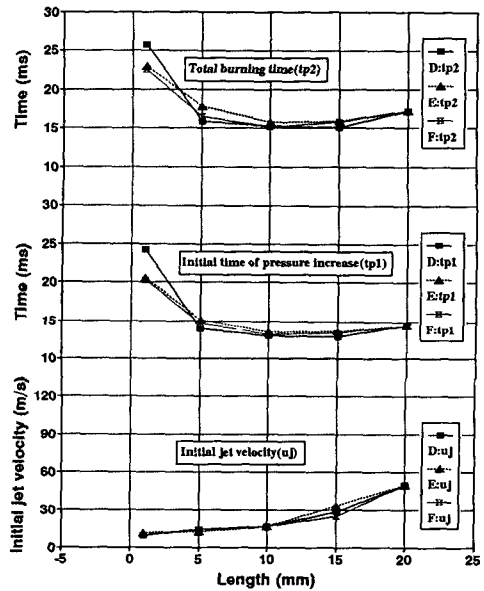


(b)  $t_{p1}$ ,  $t_{p2}$ ,  $u_j$

Fig. 13 Combustion characteristics of type C

양호하였으며, 특히  $l=10$  mm 일때의 연소추진효과가 가장 양호하게 나타나고 있어 길이변화에 따른 영향도 중요하게 작용하고 있음을 알 수 있다. D, E 및 F 타입 : D, E 및 F 타입은 C 타입의 부실 쪽 연락공 형상을 원뿔형에서 원통형 ( $d=18$  mm) 으로 바꾸고 2 차연락공 ( $d=5.5$  mm) 의 길이를 변화시킨 것으로, D 타입의 2 차연락공은 A 타입의 형상, E 타입의 2 차연락공은 B 타입의 형상 ( $\alpha=10^\circ$ ), 그리고 F 타입의 2 차연락공은 B 타입의 형상 이외에 직경이 1 mm 인 난류발생용의 보조연락공을 가지고 있다. (Table 1 참조)

Fig. 14 의 (a) 와 (b) 는 이들 D, E 및 F 타입의 연소특성을 나타낸 것으로, C 타입과 마찬가지로 연락공 길이  $l$  이 길어질수록  $u_j$  가 증가하고  $t_{p1}$  및  $t_{p2}$  가 단축되며  $P_{max}$  및  $(dP/dt)_{max}$  은 낮아지고  $t_b$  는 길어진다. 이러한 성향을 절대값으로 C 타입과 비교하여 보면 D, E 및 F 타입의  $t_{p1}$  과  $t_b$  가 단축되고  $P_{max}$  이 높아 연소추진효과가 더 있음을 알 수 있다. 이와같은 점은 D, E 및 F 타입 설계시 고려한바와 같이 부실쪽 연락공을 지나는 분류화염이



(b)  $t_{p1}$ ,  $t_{p2}$ ,  $u_j$

Fig. 14 Comparison of combustion characteristics

연락공 벽면에 빼앗기는 열량이 상대적으로 적어 최종적으로 주실내에 분출된 분류화염에 내포된 열량이 많아 조기착화되고 또한 상대적으로 많은 가스를 연소시킬 수 있기 때문인 것으로 생각된다.

E 타입 연락공의  $t_{p1}$  은  $l=1$  mm 때만을 제외하고, D 타입의 그것에 비해 모두 약간씩 지연되고 있으나  $P_{max}$  과  $(dP/dt)_{max}$  은 거의 비슷하다. 이는 B 타입과 마찬가지로 부실에서 생성된 화염전면이 주실측으로 분출된 후 주실벽면에 충돌, 일부 선회류를 형성하면서 냉각되기 때문에  $t_{p1}$  는 약간 길어지지만 이 경우에 있어서도 D 타입과 같이 초분산연소형태를 띠기 때문에 기타 연소특성은 비슷

하게 나타나고 있으며, 연소촉진효과도 양호하다.

F 타입의 연소특성 또한, E 타입의 경우와 거의 비슷하게 나타나고 있으며,  $t_{p1}$  과  $t_p$  은 단축되고 있어 보조연락공의 설치가 어느정도 연소를 촉진하고 있음을 알 수 있다. 이는 직경 5.5 mm 를 통해 분출된 분류화염이 주실 중심부근까지 진행할때 보조연락공을 통해 분출된 분류가 주실혼합기에 또 다른 난류를 발생시켜 정미연소시간을 단축시켜주기 때문인 것으로 생각된다. (Fig. 15(a) 참조)

이상 D, E 및 F 타입에 있어서도  $t_{p1}$  및  $t_{p2}$  는  $l=10$  mm 때가 가장 단축되고 있어 2차연락공길이에 따른 연소촉진효과가 있음을 알 수 있으며, 또한  $l=1$  mm 인 경우에  $P_{max}$  는 가장 높지만,  $t_{p1}$  및  $t_{p2}$  가 상당히 지연되고 있어 오리피스형태를 갖는 연락공의 연소특성은 부실식 엔진의 연소촉진에 도움이 없을 것으로 판단된다.

Fig. 15의 (a)와 (b)는 D~F 타입 연락공중에서 연소촉진효과가 가장 양호한  $l=10$  mm 인 경우에서 주실내 혼합기 착화시점의 화염전파사진 및 열발생률선도를 각각 나타낸 것이다. 사진으로부터 알 수 있듯이, 착화시점의 화염전파형태는 연락공의 형상에 따라 차이를 보이고 있다. D 타입의 경우 주실후미 벽면에 직각으로, E 타입의 경우  $10^\circ$ 의 각도를, F 타입의 경우  $10^\circ$  각도 이외에 난류발생용 보조연락공으로부터의 분류(주실내의 가스다란 분류화염)가 주실내 혼합기를 충분히 교반

시켜 순환류를 생기게 함으로서 주실내 전역에 걸쳐서 미세한 스케일의 강한 난류연소형태를 취하고 있다. 열발생률선도의 형태는 주실내 혼합기의 착화시점 및  $(dP/dt)_{max}$  값에 따라 약간의 차이를 보여주고 있으며, 그 절대값은 D 타입의 경우가 가장 크다.

이상 C~F 타입의 연락공에 대한 연소특성들을 살펴본 결과 연락공의 형상 및 길이를 변화시켜줌으로서 임계직경을 갖는 A, B 타입의 연락공보다 연소촉진효과가 더 있었으며,  $l=10$  mm 인 경우가 대체로 연소촉진효과가 양호한 것으로 나타났다.

#### 4.4 최적형상의 결정

A~F 타입의 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 연소압력상승률( $\alpha$ ), 연소시간단축율( $\beta$ )의 합으로서 나타나는 총연소촉진율( $\zeta$ )을 정의하였고, 이들을 상호비교 하였다.

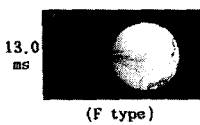
$$\zeta = \alpha + \beta \quad (1)$$

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

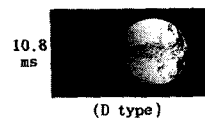
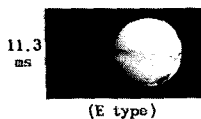
$$\beta = \frac{t_{max(S)} - t_{max(D)}}{t_{max(S)}} \quad (3)$$

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. 16 은 상기 6 가지 연락공의 각 타입에 있어서 연소촉진효과가 가장 양호한 경우(A 타입  $d=5.5$  mm, B 타입  $\alpha=10^\circ$ , C 타입  $l=10$  mm, D 타입  $l=10$  mm, E 타입  $l=10$  mm, F 타입  $l=10$



(a) Flame propagation processes



(b) Heat release rate

Fig. 15 Flame propagation processes and heat release rate of type D, E and F ( $l=10$  mm) type D, E and F ( $l=10$  mm)

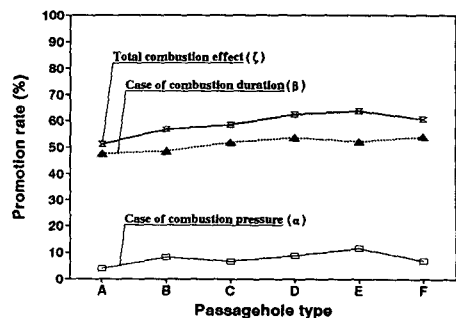


Fig. 16 Comparison of combustion promotion rate

mm)만을 택하여,  $\alpha$ ,  $\beta$  및  $\zeta$ 에 대해 나타낸 것이다. 그림으로부터도 알 수 있듯이, 모든 타입에 있어서  $\alpha$ 는  $\zeta$ 의 경향을 변화시킬 만큼 큰 값이 아니며, 그 절대값도  $\beta$ 에 비해 작기 때문에 부실식 연소실내에서의 연소촉진효과는 주로  $\beta$ 가 결정한다고 볼 수 있다.

총연소촉진율  $\zeta$ 를 기준으로 임계연락공을 갖는 A 타입 연락공의 형상변화에 따른 연소촉진효과를 평가하여 볼 때, 연소촉진효과는 부실축 연락공이 원통형이고 2차 연락공길이를 변화시킨 E, D 타입의 경우가 가장 뛰어나며, E 타입에 보조연락공을 설치한 F 타입, 부실축 연락공이 원뿔형이고 2차 연락공길이를 변화시킨 C 타입, 주실에 대해 일정 각도를 갖는 B 타입순으로 나타나고 있다.

따라서, 추후 실제 부실식 가스엔진의 설계시 연락공의 직경뿐만 아니라 연락공의 각도, 형상 및 2차연락공의 각도, 길이도 반드시 고려해 주어야 할 것을 판단된다.

## 5. 결론

부실이 있는 정적연소실을 사용, 주·부실의 체적비와 당량비가 일정할 때 임계직경을 갖는 연락공의 형상변화에 따른 주실내 연소특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연락공직경은 주실내 연소특성에 큰 영향을 미치며, 연소압력 및 연소시간에 경계가 있고 초분산연소형태를 띠는 임계직경의 경우가 연소촉진효과가 가장 좋았으며 열발생률도 급격하게 나타났다.

(2) 연락공에 일정각도를 줌으로서 A 타입(임계직경)에 비해 다소 연소촉진효과가 있었으며,  $\alpha=10^\circ$ 가 적정분출각도로 나타났다.

(3) 주실의 연소특성은 C, D, E 및 F 타입과 같이 부실축 연락공의 형상과 2차연락공의 길이, 각도 및 보조연락공 등을 설치함으로써 크게 영향을 받으며, 연소촉진효과는  $l=10\text{ mm}$ 의 경우가 대체적으로 양호하였다.

(4) 총연소촉진율  $\zeta$ 를 기준으로 A 타입(임계연락공) 연락공의 형상변화에 따른 연소촉진효과를 평가하여 볼 때, 연소촉진효과는 E, D 타입이 가장 뛰어나며, F와 C 그리고 B 타입 순서로 나타났다.

(5) 추후 실제 부실식 가스엔진의 설계시 연소실

형상에 따라 연락공의 직경뿐만 아니라 연락공의 각도, 형상 및 2차연락공의 길이도 반드시 고려하여야 하며, 연락공의 형상은 E, D 타입이 가장 적당한 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- (1) Bokura, D. and Nakazoro, T., 1992, "YANMAR-NHLG 形 稀薄燃燒 가스機關의 研究と 開發," 內燃機關, Vol. 31, No. 387, pp. 87~93.
- (2) Noguchi, M., Sanda, S. and Nakamura, N., 1976, "Development of Toyota Lean Burn Engine," SAE Paper 760757.
- (3) Wakai, K., Shimizu, S. and Oda, Y., 1981, "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.
- (4) 山口譽起, 大岩紀生, 1983, "副室式 燃燒器内の 噴流에 의한 着火·燃燒形態," 日本機械學會論文集, 第 49 卷, 第 444 號, pp. 1390~1399.
- (5) Nakahara, T., 1976, "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.
- (6) 조경국, 정인석, 정경석, 1987, "分割燃燒室内の 對向噴出火焰의 燃燒特性에 관한 研究," 한국자동차공학회지, 제 9 권, 제 4 호, pp. 50~60.
- (7) Klomp, E.D. and Deboy, G.R., 1976, "The Effects of Fluid Motions on Combustion in a Pre-chamber Bomb," SAE Paper 760162, pp. 739~750.
- (8) 김봉석, 권철홍, 류정인, 1992, "副室式 定積燃燒室內的 燃燒特性에 관한 研究," 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문초록집, pp. 84~91.
- (9) Yamaguchi, S., Ohiwa, N. and Nishie, Y., 1981, "Combustion Mechanism in Prechamber Combustor," 日本機械學會論文集, Vol. 47, No. 419, pp. 1390~1399.
- (10) 이상준, 김삼석, 이종태, 이성열, 1992, "부실불이 정적연소실의 연소촉진효과," 대한기계학회논문집, 제 16 권 제 3 호, pp. 569~577.
- (11) Wakai, K., Shimizu, S., Fuma, H. and Taniguchi, H., 1981, "Development of Toyota Lean Burn Engine," SAE Paper 760757.

chi, H., 1985, "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.

(12) 徐錫洪, 1965, "豫燃燒室 ヂイ-ゼル機關の 燃燒に關する 研究(第1報)," 日本機械學會論文集, Vol. 31, No. 225, pp. 808~822.