

선회류가 있는 연소실의 연소에 미치는 점화위치의 영향

The Effect of Ignition Position on Combustion in the Chamber with Swirl Flow

이 종 태*
Jong Tai Lee

ABSTRACT

The effects of ignition position on combustion in a chamber with swirl flow were investigated by use of hot wire anemometer, high speed schlieren photography, and chamber pressure measurement.

In experiments, the closed-constant volume combustion chamber was used, and the swirl was formed unsteadily by suction of external fluid after reducing pressure in the chamber.

Results show that the effect of ignition position on combustion depends on the flow state and the flame propagation distance corresponding to each ignition position. Also, the effect of combustion promoting increases as an ignition position moves from the center of chamber to the outside, but maximum burning pressure was obtained at the position that is the shortest flame propagation distance.

1. 서 론

스파크 점화기관에서 연소를 안정시키고 연소효율을 증가시키기 위하여 연소실내에 선회류를 형성시켜 혼합기의 유동증가로 연소를 촉진시키는 방법 또는 점화위치를 이용하여 화염전파거리를 단축시키는 방법 등이 활용되고 있다.¹⁾ 혼합기내의 유동을 증가시켜 연소를 촉진시키는 방법은 연소촉진이 유동중에 수반되는 난류의 크기에 따라 좌우되며, 이 난류의 크기가 대체로 혼합기의 유동속도에

의존하여 생성된다는 것에 기인한다.^{2~4)} 또한 점화위치를 이용하여 연소의 증진을 도모하는 것은 주로 화염전파거리의 단축에 의한 연소시간 감소에 의한 것이다.⁵⁾

이러한 연소촉진 방법을 복합적으로 활용하는 것은 연소를 한층 촉진시킬 수 있는 방법으로 사려된다. 이렇게 하기 위해서는 선회류의 유동장을 파악하여 선회류가 있는 유동장내에서 점화위치가 연소에 미치는 영향의 규명이 이루어져야 한다.

따라서 본 연구에서는 연소에 미치는 상기

인자의 복합적인 영향을 규명하기 위하여 먼저 정적연소실내에 비정상적으로 형성되는 선회류내의 유동 및 난류의 거동을 열선풍속계에 의하여 정량적으로 파악하였다. 그리고 이들의 해석결과를 선회중인 혼합기에 대하여 점화위치를 변화시켜서 연소실험을 하여 쉐리렌(schlieren)방법에 의한 화염전파과정의 가시화 결과와 연소속도, 연소압력 등의 측정결과를 결부시켜 선회류를 갖고 있는 연소실에 있어서 연소에 미치는 점화위치의 영향을 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치의 개요

실험에는 유동 및 연소현상을 단순화하기 위하여 정적연소실을 사용하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용한 정적연소실을 도시화한 것이다. 정적연소실은 직경 80 mm, 두께 20 mm의 원통형이며, 화염전파과정을 가시화하기 위하여 연소실의 양측면에 두께 10mm의 경화유리를 붙였다. 흡입구(직경 6.5 mm)는 연소실에 점선적으로 위치하며, 흡입구 형상은 원관형이다. 선회류의 유속을 열선풍속계에 의하여 측정하기 위한 열선프로브의 삽입구는 60° 간격으로 세곳에 설치되어 있다. 측정위치는 열선프로브를 반지름 방향으로 움직이는 것에 의하여 변화시킬 수 있으며, Fig. 2는 유속의 측정위

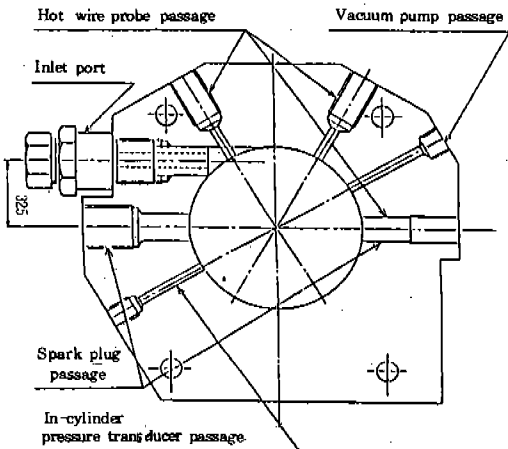


Fig. 1 Details of closed combustion chamber

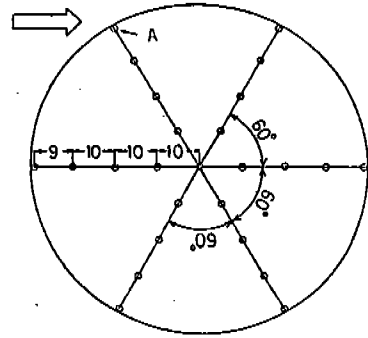


Fig. 2 Measurement positions of velocity

치를 나타낸 것이다. 열선프로브의 삽입높이는 모두 연소실 높이의 중앙에 위치한다. 점화플러그는 플러그의 중심전극 끝에 직경 2mm의 황동선을 연결해 연소실내의 중심을 향하여 대칭으로 설치하였다. 점화플러그 전극의 틈새는 1mm이며, 전극단단의 방전면은 평면이다. 또한 연소실의 외측에는 흡·배기밸브 및 압력변환기가 설치되어 있다.

Fig. 3은 실험장치 구성의 개략도이다. 선회류의 유속측정에는 정온도형 열선풍속계를 사용한다. 열선프로브는 I형 프로브를 사용하며, 열선프로브의 설치방향은 각 측정 위치에 대하여 모두 반경방향에 수직인 방향이다. 연소실내의 압력측정에는 스트레인-게이지식 압력변환기를 사용한다. 열선풍속계와 압력변환기를 사용하여 측정한 유속과 압력은 스토리지 스코우프에 메모리한 후 GP-1B 인터페이스를 통하여 컴퓨터에 입력시켜 해석한다. 화염이 전파하는 형상을 가시화하기 위하여 고속도 쉐리렌촬영(촬영속도 약 4000장/초)을 한다. 쉐리렌장치의 오목거울은 직경 230 mm, 집적거리 2 m이며, 광원은 1 Kw의 초고압수는 등이다. 연료-공기 혼합장치는 체적법에 의해 혼합비를 결정할 수 있는 혼합장치이다. 점화장치는 콘덴서식 점화장치를 사용하며, 점화에너지는 약 500 mJ이다. 고속카메라의 작동, 흡입밸브의 개폐 및 점화시기는 시간제어장치로 제어한다.

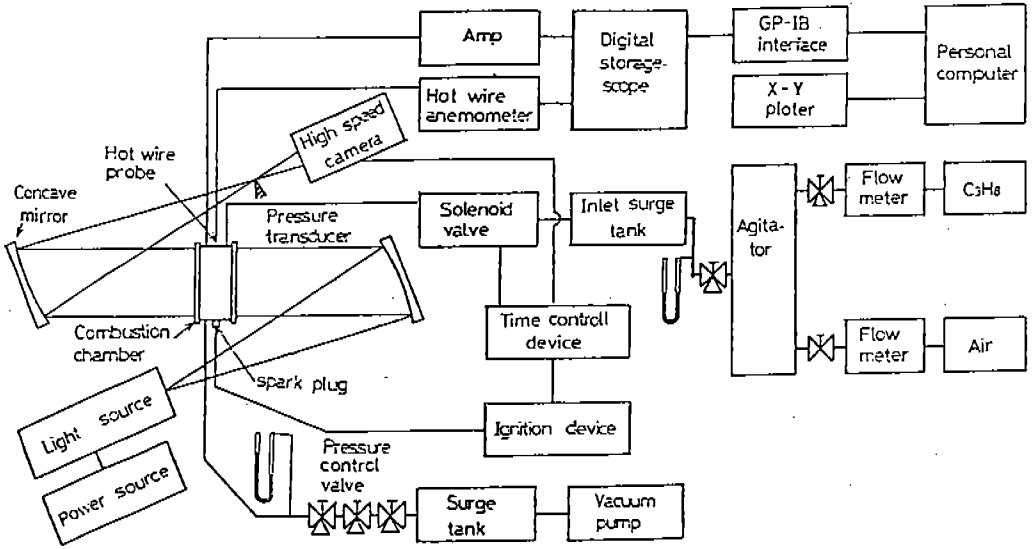


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 실험방법

선회류는 연소실내의 압력을 감소시킨후 흡입구쪽의 전자기 밸브를 개폐하여 형성시키며, 실험방법은 다음과 같다.

선회속도의 변화 : 선회속도의 변화는 연소실내의 초기압력을 변화시키는 것에 의하여 변화시킨다. 연소실내의 초기압력은 진공펌프를 사용하여 변화시키며, 대기압과 연소실내의 압력과의 차(이하 흡입압력이라 부르기로 한다)가 $4P_0 = -60 \text{ mmHg}, -140 \text{ mmHg}, -220 \text{ mmHg}, -300 \text{ mmHg}$ 가 되도록 단계적으로 변화시킨다.

점화위치의 변화 : 점화위치는 Fig. 4와 같이 연소실의 중심, 연소실 반지름 40mm의 1/2인 위치, 즉 중심으로부터 20mm 위치 및 연소실벽, 즉 중심으로부터 40mm 위치인 세 곳이다. 이하 이와같은 점화위치에서의 점화를 각각 중심점화, 0.5R 점화, 1.0R 점화라 칭한다.

선회류의 유속을 측정하는 경우는 공기로 하며, 연소실험의 경우는 당량비 $\phi = 1.1$ 의 프로판-공기 예혼합기로 한다. 이들은 대기압 및 실온하에서 유입된다. 전자기밸브의 개폐

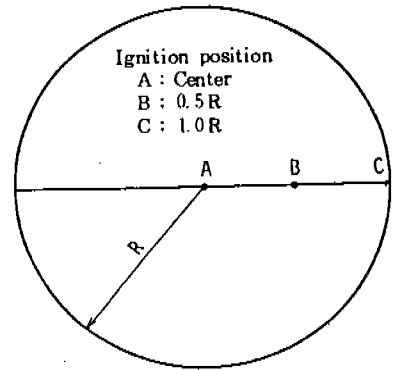


Fig. 4 Ignition positions

시간은 30 ms 이고, 점화시점은 전자기 밸브에 열림신호가 있고부터 50 ms 후이다. 유속의 측정횟수는 각 측정위치에서 각각 20회 측정한다.

2.3 난류와 연소속도의 측정

2.3.1 난류강도 및 유속

선회류내에 존재하는 난류는 다수 실험치의 앙상블(ensemble) 평균치와 각 순간속도의

차, 즉 변동속도의 RMS로 정의되는 난류강도 It 로 나타낸다. 시간 t 에 대한 난류강도 $It(t)$ 는 다음과 같은 식으로부터 구한다.

$$It(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Um(t) - Ui(i, t))^2} \dots (1)$$

여기서, $Um(t)$: 시간 t 에 대한 앙상블평균 속도

$Ui(i, t)$: i 번째 측정에 있어서 시간 t 에 대한 순간속도

N : 측정횟수

열선풍속계로 측정한 유속은 연소실내의 압력변화에 대하여 보정을 하였다.⁶⁾ 따라서 이하 표시되는 유속은 20회 측정된 측정속도의 보정속도를 앙상블 평균한 평균보정속도이며, 시간 t 에 대한 앙상블 평균속도 $Um(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$Um(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Ui(i, t) \dots (2)$$

2.3.2 연소속도

연소속도는 화염면앞의 미연혼합기가 화염면으로 유입되는 속도로 볼 수 있으므로 연소속도 St 는 화염면으로 유입되는 미연혼합기의 질량보존식을 적용하여 다음과 같이 결정한다.

$$St = \frac{dM_b/dt}{A_f \rho_u} \dots (3)$$

여기서 dM_b/dt : 질량연소율

A_f : 화염면적

ρ_u : 미연가스의 밀도

이 식으로부터 연소속도 St 를 구하기 위하여 다음과 같은 가정을 한다. (1) 연소부분과 미연소부분은 화염면에 의해 구분되며, 이 화염면의 두께는 무시할 수 있다. (2) 연소실내의 압력은 공간적으로 동일하다. (3) 연소부분과 미연소부분은 열역학적 평형상태이다. (4) 화염성장과 더불어 미연가스는 단열압축된다.

이 경우 연소가스의 질량과 체적은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_b = M_o - M_u \dots (4)$$

$$V_b = V_o - V_u \dots (5)$$

여기서 M_o : 혼합기의 전질량

M_u : 미연가스의 질량

V_o : 연소실의 체적

V_u : 미연가스의 체적

한편, 연소실내의 미연가스는 화염이 성장됨과 더불어 단열압축되므로 미연가스의 밀도와 연소실내의 압력과의 관계는

$$\frac{d\rho_u}{dP} = \frac{dP}{\kappa_u P} \dots (6)$$

여기서 κ_u : 미연가스의 비열비

그러므로 식(3)에 식(4), (5)와 식(6)을 대입하면, 연소속도 St 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$St = \frac{dV_b}{A_f dt} - \frac{(V_o - V_b)}{A_f \kappa_u P} \frac{dP}{dt} \dots (7)$$

식(7)에 각각의 점화위치에 대해서 측정한 연소압력 P 와 가시화 사진으로부터 구한 연소가스의 체적 V_b 및 화염면적 A_f 를 대입하여 연소속도 St 를 구할 수 있다.

3. 선회류의 거동

3.1 속도분포

Fig.5는 연소실내의 흡입압력을 변화시킨 경우 연소실내에 흡입형성된 유동의 유속을 Fig.2의 측정위치에서 측정하여 시간의 경과에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 유속은 열선프로브의 설치방향이 연소실의 반지름방향에 수직인 방향이므로, 유속의 절대치만을 나타내며, 그 방향은 표시되어 있지 않다. 각 흡입압력에 대해서 연소실내에 형성된 유동의 속도분포는 연소실의 외측부근의 속도가 크고 중심부근이 작다고 하는 선회류의 속도분포를 나타내고 있다. 그리고 속도분포에서 유속이 작은 곳을 선회류의 중심이라고 생각하면, 선회류의 선회중심은 초기에 연소실의 중심으로부터 다소 벗어나 있지만 시간이 경과하여 유속이 감소함에 따라서 연소실 중심쪽으로 선회중심이 움직이는 것을 알 수 있다. 이와같은 경향은 연소실내의 흡입압력이 변화하여도 동일하다. 따라서 선회류는 초기에 선회류의 선회중심이 연소실의 중심으로부터 편심

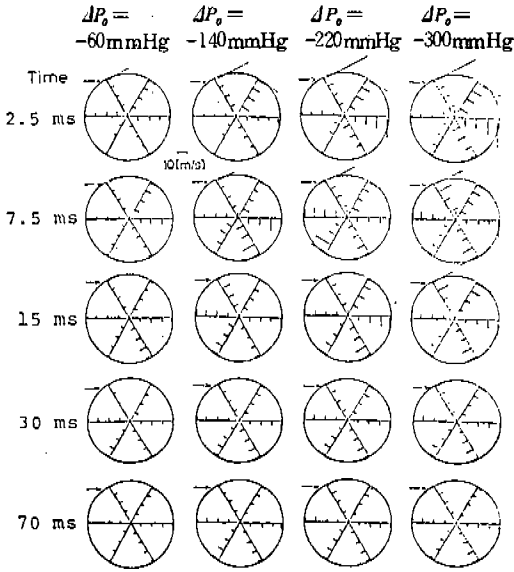


Fig. 5 Velocity distribution of swirl versus time for initial inlet pressure

되어 있는 편심 선회류를 나타내지만, 시간이 경과함에 따라서 선회중심이 연소실의 중심과 일치하는 강제와류(rigid swirl)인 선회류로 형성되는 것을 알 수 있다. 편심선회류에서 강제와류인 선회류로 되는 기간은, 흡입압력의 변화에 따라 다르지만, 시간의 경과에 따른 속도분포를 보면, 유체가 흡입되면 곧 바로 강제와류인 선회류로 되는 것을 알 수 있고, 따라서 본 실험의 전화시점에는 강제와류인 선회류가 형성되었다고 생각된다. 한편, 속도 분포에서 유속이 큰 부분을 선회류의 선단부분이라고 생각하면, 선회속도는 흡입압력의 증가에 의해서 증가함을 할 수 있으며, 이 선회속도는 다음과 같이 구한다.

3.2 선회속도

선회속도는 열선풍속계로 측정된 선회류의 유속으로부터 다음과 같이 정의하여 구한다. 열선풍속계로 측정된 유속은 절대치만을 나타내고 그 방향은 알 수 없으나, 이 유속은 접선방향과 반경방향의 속도로 나누어 후자는 전자에 비하여 아주 작다고 가정한다. 또한 선회류는 강제와류적인 선회를 한다고 본다. 이때 선회속도 Sw 는 Fig. 2의 각 위치에서

측정한 평균속도로부터 각속도를 구한 후, 이들을 평균함으로써 결정할 수 있다. 즉 시간 t 에 대한 선회속도 $Sw(t)$ 는 다음과 같이 구한다.

$$Sw(t) = \frac{1}{N_p} \sum_{p=1}^{N_p} \frac{Um(P, t)}{r_p} \dots\dots\dots (8)$$

- 여기서 $Um(P, t)$: 측정위치 P 에서 시간 t 에 대한 평균속도
- r_p : 중심으로부터 측정위치 P 까지의 거리
- N_p : 측정위치수

Fig. 6은 흡입압력을 변화시킨 경우 형성된 선회류의 선회속도 Sw 를 상기 방법으로 구하여 시간의 경과에 대하여 나타낸 것이다. Sw 를 구하는데 있어서 연소실의 중심에서 측정된 결과는 중심의 유속이 없다는 강제와류의 관점에 의해서 고려하지 않았다. Sw 는 초기에 급격히 증가를 하여 빠른 감소를 나타낸 후 다소 완만한 감소를 나타낸다. Sw 의 급격한 감소는 흡입압력의 감소에 의한 흡입유속의 급격한 감소에 의하며, Sw 의 완만한 감소는 유체가 갖는 운동에너지가 난류산일(dissipation)에 의해 감소하는데에 기인한다. 흡입압력의 증가에 따라서, 흡입초기의 Sw 는 현저히 증가를 하지만 곧 감소하여 약 20ms 후 Sw 는 약 200 rad/s 정도로 거의 일정함을 나타낸다. 위의 결과로부터 흡입압력을 약 -140 mmHg 이상 증가시켜도 약 20 ms 이후의 선회속도는 크게 증가하지 않는다는 것을 알 수 있다. 흡입압력이 -60 mmHg인 경우 Sw 가 전체적으로 작은 값을 나타내는 것은 연소실내에 흡입되는 유체의 운동량이 작은 것에 의한 것이다. 흡입압력이 -300mmHg인 경우 Sw 는 최대 약 456 rad/s를 얻었다.

선회류의 선회속도는 시간의 경과에 따라 변화하므로 선회속도, 즉 선회류의 크기는 상기의 흡입압력에 대해 형성된 최대속도 $Um(max)$ (Fig. 2의 A 점에서의 측정치)를 대표치로 나타낸다. 대기압과 연소실내의 압력과의 차 ΔP_0 가 -60mmHg, -140 mmHg, -220 mmHg, -300 mmHg에 대해서 선회류의 최대속도 $Um(max)$ 는 각각 29m/s, 52m/s, 67

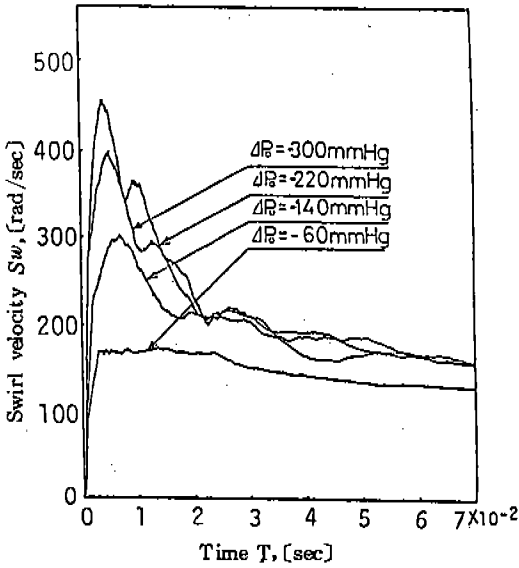


Fig. 6 Swirl velocity S_w for initial inlet pressure

m/s, 77 m/s를 얻었다.

3.3 난류강도

Fig. 7에 선회류내에 수반되는 난류의 측정 일례를 나타낸다. Fig. 7의 (1)에서 난류강도 I_t 는 20회 측정된 유속의 측정결과를 식(1)에 대입하여 구한 것이며, 측정위치는 흡입구 출구로부터 1mm 떨어진 지점(Fig. 2의 A 지점)이다. 각 선회류내에 생성되는 난류강도 I_t 는 초기에 큰 변동을 나타내다가 시간의 경과에 따라 I_t 가 감소하면서 변동 또한 감소한다. 시간의 경과에 대해서 I_t 의 변동이 큰 부분은 연소실내로 유체가 분류(jet)형태로 흡입될 때의 초기에 생기는 난류생성부분이며, I_t 의 변동이 작은 부분은 선회류가 형성된 후 유동중에 생기는 난류를 나타낸다. 또한, 선회류속도를 나타내는 최대속도가 증가함에 따라서 I_t 는 대체적으로 증가함을 나타낸다. 선회류속도의 변화에 따른 난류의 생성을 비교하기 위하여 양상불 평균속도에 대한 난류강도의 비로 정의되는 상대난류강도 I_{tr} 을 정의하였고 Fig. 7의 (2)에 선회류속도 변화에 대한 I_{tr} 을 나타낸다. 시간 t 에 대한 상대난류

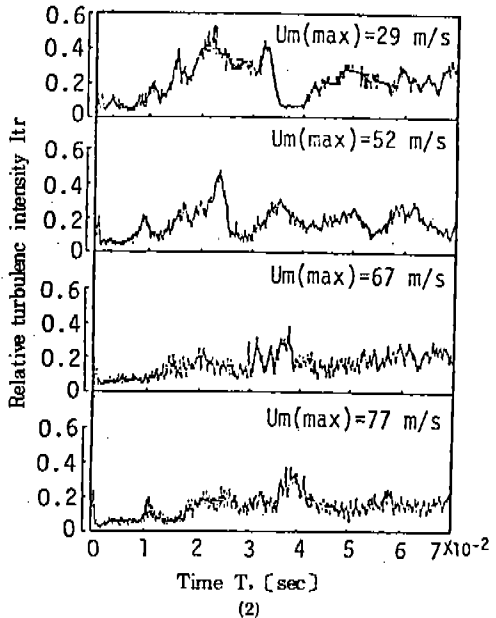
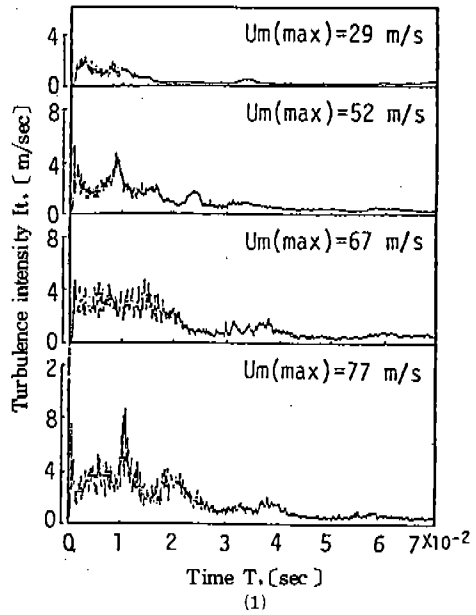


Fig. 7 Turbulence intensity I_t and relative turbulence I_{tr} for maximum inlet velocity of swirl

강도 $I_{tr}(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$I_{tr}(t) = \frac{I_t(t)}{U_m(t)} \dots\dots\dots (9)$$

Fig. 7의 (2)에서 유체가 흡입될 때의 초기

에 생기는 난류의 생성을 즉 상대난류강도 I_{tr} 은 선회속도의 변화에 따라서 큰 차이를 나타내지 않으며, 이것은 난류가 유속의 증가에 따라서 비례적으로 증가하기 때문이다. 또한 시간의 경과에 따라서 I_{tr} 이 다소 증가하고 선회류가 형성된 후 유동중에 생기는 I_{tr} 이 선회속도가 작을때 다소 크게 나타나는 것은 선회류내에 수반되는 난류 I_t 의 감쇄보다 평균속도 U_m 의 감소가 빠르는데 기인한다. 4 종류의 선회속도 변화에 대한 최대난류강도 I_t 는 약 9 m/s를 얻었다.

4. 연소에 미치는 점화위치의 영향

4.1 화염전파의 가시화

선회류의 흡입속도가 $U_m(max) = 0 \text{ m/s}$, $U_m(max) = 77 \text{ m/s}$ 인 경우, 각 점화위치에 대한 연소의 가시화 사진을 시간의 경과에 대하여 Fig. 8에 나타낸다. 선회류가 없는 경우, 즉 $U_m(max) = 0 \text{ m/s}$ 의 경우, 화염은 점화위치

로부터 화염면앞의 미연혼합기에 대하여 원형으로 전파하는 구형화염형상을 나타내며, 화염면도 대개 균일하다. 화염이 전파하는 기간은 중심점화, 0.5R 점화, 1.0R 점화의 순으로 길어지며, 이것은 중심점화에서 1.0R 점화로 갈수록 화염전파거리가 길어지는데 의한 것이다. 0.5R 점화에 있어서 초기의 화염형상이 두개의 화염으로 따로따로 형성되어 전파하는 것같이 보이는 것은 점화봉에 의한 냉각작용에 기인한 것이라 생각된다. 한편, 선회류가 형성되어 선회류의 최대속도가 $U_m(max) = 77 \text{ m/s}$ 의 경우, 중심점화시의 화염은 연소실중심을 중심으로 강제와류인 선회를 하면서 대개 동심원형의 형태로 화염면 앞의 미연혼합기를 향하여 화염전파하는 형상을 나타낸다. 그러나, 점화위치가 연소실의 중심을 벗어나면 화염은 선회류외측의 주류를 타고 화염전파하는 화염형상을 나타내며, 1.0R 점화의 경우는 초기의 화염이 선회류외측의 강한 주류에 의해서 점화위치를 벗어나 선회류를 타

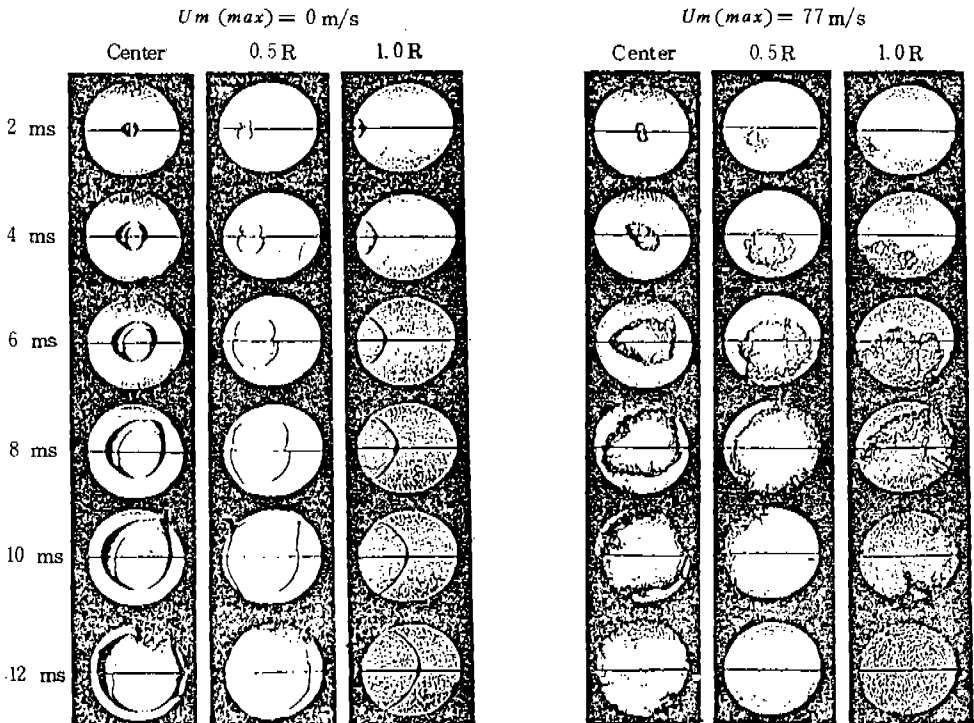


Fig. 8 Visualization photographs of flame propagation for each ignition in cases that $U_m(max) = 0, 77 \text{ m/s}$; Photographing speed = 4,000 pps

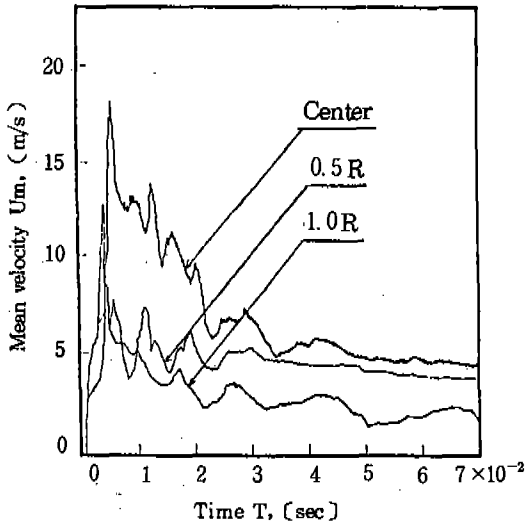


Fig. 9 The mean velocity U_m versus time for each ignition position

고 흘러나가는 것을 나타낸다. 화염전파기간은 점화위치가 연소실의 중심으로부터 벽쪽으로 가는데 따른 화염전파거리의 증가에도 불구하고 선회류가 없는 경우와 반대로 짧게되는 경향을 나타낸다. 이와같은 경향은 연소실 내에 형성되는 강체의류인 선회류의 유속이 연소실의 중심으로부터 외측으로 갈수록 크게 되어, 1.0R 점화쪽의 혼합기 이동속도가 중심점화의 경우보다 큰 것에 기인한다. 이것은 각 점화위치에서 측정된 유속의 결과를 나타내는 Fig. 9로부터 쉽게 알 수 있다. Fig. 9에서 유속은 선회류의 속도분포와 같이 중심점화, 0.5R 점화, 1.0R 점화의 순으로 크게 되며, 이 경향은 시간이 경과하여 속도가 감소되어도 같은 경향을 나타낸다.

4.2 연소압력 및 연소시간

Fig. 10은 점화위치의 변화에 대한 최고연소압력 P_{max} , 연소최고시간 t_b 및 연소압력상승률 R_{pt} 를 선회류의 최고속도가 $U_m(max) = 0m/s$, $U_m(max) = 77m/s$ 에 대해서 나타낸 것이다. 여기서 t_b 는 점화신호가 있고부터 P_{max} 에 이르는 데 소요되는 시간이고, R_{pt} 는 $R_{pt} = (P_{max} - P_0) / t_b$ 이다. P_0 는 연소실 내의 초기압력이다. 또한 그림에서 $r/R = 0$

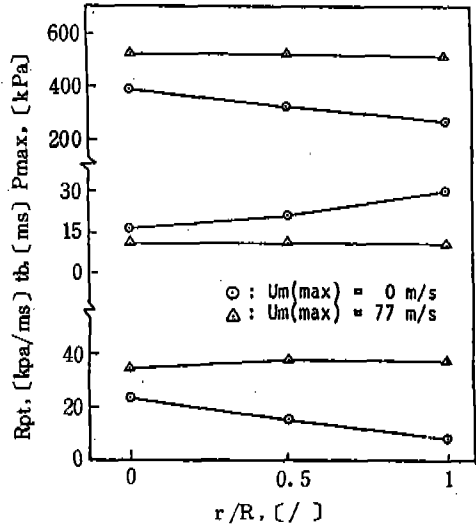


Fig. 10 Maximum burning pressure P_{max} , burning time t_b and rate of burning pressure rise R_{pt} for ignition position in cases that $U_m(max) = 0, 77 m/s$

인 곳이 중심점화, $r/R = 1$ 인 곳이 1.0R 점화이다.

선회류가 없는 경우, 즉 $U_m(max) = 0m/s$ 의 경우, 점화위치를 연소실의 중심으로부터 벽쪽으로 바꾸면 최고연소압력 P_{max} 는 감소, 연소시간 t_b 는 증가하며, 이들의 경향에 의해서 연소압력상승률 R_{pt} 는 감소를 나타낸다. 이와 같은 경향은 주로 점화위치를 연소실의 중심으로부터 벽면쪽으로 바꾸는데 따른 화염전파거리의 증가로 인하여 화염전파기간이 길어지고, 또한 이것에 의해서 가스로부터 벽면으로의 방열시간이 증대하는 것에 기인한다. 그러나, 선회류의 최대속도가 $U_m(max) = 77 m/s$ 의 경우, P_{max} , t_b 및 R_{pt} 는 점화위치에 관계없이 거의 일정함을 나타낸다. 이것은 선회류속도의 증가에 따른 유동내의 난류 증가로 연소가 촉진되어서, 화염전파거리의 증가에 따라 증가되는 t_b 가 상쇄되며, 또한 이에 따른 열전달량의 감소에 기인하여 P_{max} 도 큰 차를 보이지 않는 것이라 볼 수 있다.

이와같이 P_{max} , t_b 및 R_{pt} 가 선회류의 최대흡입속도의 증가, 즉 선회류속도의 증가에 따라서 점화위치에 관계없이 거의 일정함을 나

타내는 것은 점화위치에 대한 화염전과거리 변화의 영향이 선회속도를 증가시키는 것에 의하여 상쇄된다는 것을 의미한다. 이 경향은 각 점화위치에 있어서 최대속도의 변화에 대한 최고압력상승 ΔP_{max} ($= P_{max} - P_0$), 연소압력상승비 $R_{\Delta P}$ 의 변화를 나타내는 Fig. 11로부터 다시금 확인된다. Fig. 11에서 $R_{\Delta P}$ 는 정지혼합기의 경우를 기준치로 하는 ΔP_{max} 의 비이다. 선회류의 최대속도가 증가함에 따라서 ΔP_{max} 는 전체적으로 증가하며, 점화위치 변화에 따른 ΔP_{max} 의 차는 감소의 경향을 나타낸다. 최대속도의 증가에 따라서 P_{max} 가 전체적으로 증가를 나타내는 것은, Fig. 12의 (1)의 평균난류강도 It_m 에서 나타난 바와 같이, 혼합기내에 존재하는 난류가 공간적으로 증가하는데 기인하는 연소속진작용에 의한 것이다. 최대속도의 증가에 따라서 점화위치 변화에 따른 ΔP_{max} 의 차가 감소를 나타내는 것은, Fig. 12의 (2)에서 나타난 바와 같이, 선회류내의 국소적인 난류가 선회류의 외측으로 갈수록 대체로 크게 나타나는데 의한 영향, 즉 점화위치에 있어서의 난류강도 It 의 차이에 의한 영향에 기인한다. 이와같은 경향은, 선회속도변화에 대한 연소속진의 영향이 연소압력비 $R_{\Delta P}$ 에서 나타난 바와 같이, 점화위치를 연소실의 중심으로부터 벽쪽으로 바꿀수록 크게 된다는 것을 의미한다. 이상의 결과로부터 점화위치를 연소실의 중심으로부터 벽쪽으로 가져가면 선회류가 없는 경우는 화염전과거리가 연소를 지배하는 주요인이 되며, 선회류가 있는 경우는 선회류가 연소를 지배하는 주요인이 된다는 것을 알 수 있다. 선회류가 없는 경우로부터 선회류의 최대속도가 77 m/s 인 선회류를 형성시키면, 연소압력은 중심점화의 경우가 약 11.5%, 끝점화가 약 50% 증가하였다. 그러나 P_{max} 의 최대치는 각 선회속도에 대해서 모두 중심점화에서 일어났다. Fig. 12에서 난류강도 It 는 각 점화위치에서 측정된 국소적인 난류강도이며, 평균난류강도 It_m 은 Fig. 2의 측정위치에서 측정된 It 의 공간적평균치이다. 시간 t 에 대한 평균난류강도 $It_m(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

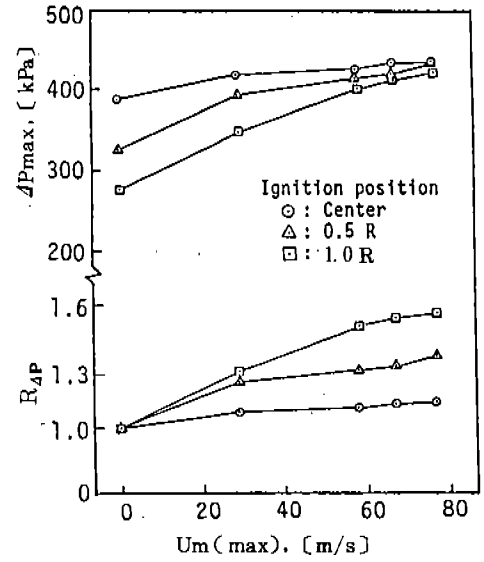


Fig. 11 Maximum burning pressure rise ΔP_{max} and ratio of maximum burning pressure rise $R_{\Delta P}$ for ignition position as a function of inlet velocity

$$It_m(t) = \frac{1}{N_p} \sum_{p=1}^{N_p} It(p, t) \dots\dots\dots (10)$$

여기서 $It(p, t)$ 는 측정위치 p 에 있어서 시간 t 에 대한 난류강도이며, N_p 는 측정위치수이다. Fig. 12의 난류거동은 3.3절의 난류강도에서 논한 바와 같다.

4.3 연소속도

연소속도는 식(7)로부터 구하며, 연소속도를 구하는데 필요한 연소가스의 체적 V_b 와 화염면적 A_f 는 다음과 같이 결정한다. 선회류가 없는 경우는, 화염이 점화위치로부터 화염면 앞의 미연가스를 향하여 구형적으로 전파하는 형상을 나타낸다. 따라서 화염의 가시화 사진으로부터 화염으로 둘러싸인 면적을 구하여 그것과 동일한 면적을 갖고 각각의 점화 위치에서 원형적으로 퍼져나가는 원의 반경을 화염반경 r_b 로 한후, 각 점화위치에서 그 화염반경에 해당하는 구형화염을 작도하여 이것으로부터 V_b 및 A_f 를 구하였다. 선회류가 형성된 경우는 유동에 의해서 화염면이 주름지며, 또한 점화위치가 연소실의 중심으로부터 벽쪽으로 바뀌는데 따라서 화염이 선회

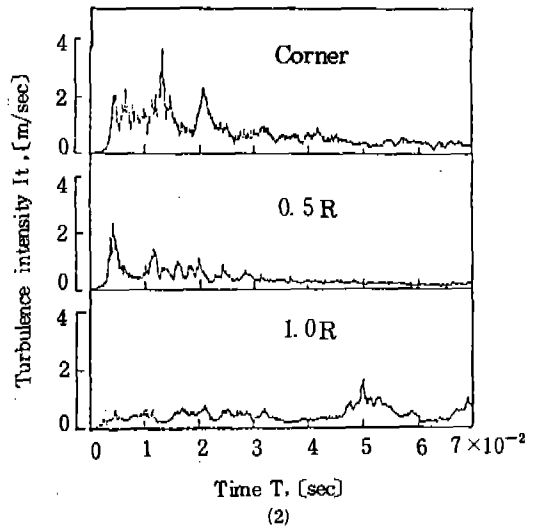
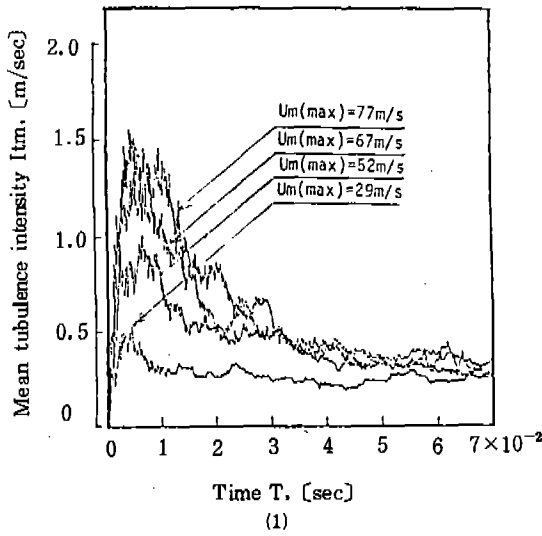


Fig. 12 Mean turbulence intensity I_m for inlet velocity and turbulence intensity I_t for ignition position

류의 외측의 주류를 타고 흘러나간다. 그러나 Fig. 8의 가시화 사진으로부터 각 시각에 대한 화염형상을 구하여 한곳에 나타낸 Fig. 13에서 보는바와 같이 선회류에 의해서 화염이 흘러가고 화염면 또한 주름지고 있지만, 화염의 전체적인 형상은 대체로 선회류가 없는 경우의 화염형상과 마찬가지로 화염면앞의 미연가스를 향하여 원형적으로 화염전파하는 형상으로 볼 수 있다. 따라서 선회류가 있는 경우도 선회류가 없는 경우와 같은 화염형상을 고려하여 가시화 결과로부터 V_b 및 A_f 를 구하였다.

Fig. 14에 각 점화위치에 대한 화염속도 (flame velocity) S_f , 연소속도 S_t 및 연소속도비 R_{st} 를 선회류의 최대속도가 $U_m(max) = 0 \text{ m/s}$, $U_m(max) = 77 \text{ m/s}$ 인 경우에 대해서 나타낸다. 여기서, 화염속도는 전술한 방법으로 화염반경 r_b 를 구하여 화염속도 S_f 는 $S_f = dr_b/dt$ 로부터 구한 것이다. 연소속도 S_t 는 r_b 가 22 mm, 23.5 mm, 25 mm에 상당하는 S_t 의 평균치이다. 또한 연소속도비 R_{st} 는 중심점화시의 연소속도가 기준치이다. 선회류가 없는 경우, 즉 $U_m(max) = 0 \text{ m/s}$ 인 경우, S_f 및 S_t 는 주로 점화위치가 변화하

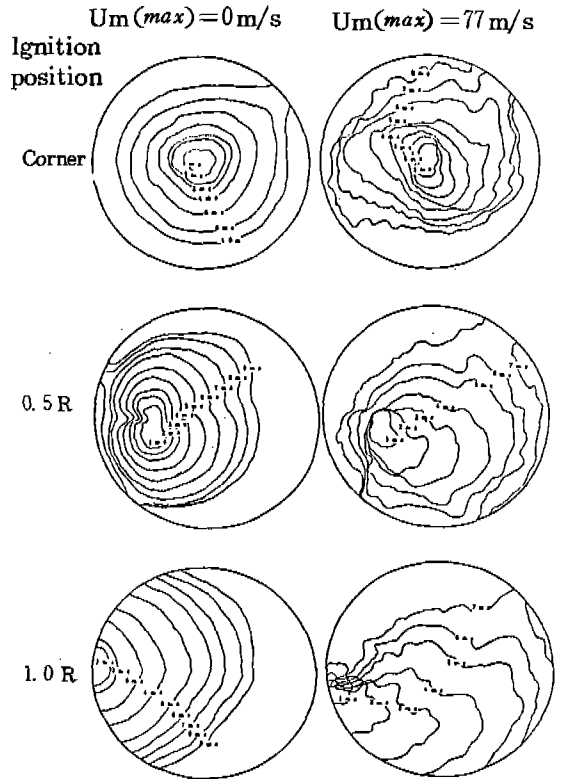


Fig. 13 Flame propagation process versus ignition position for $U_m(max) = 0.77 \text{ m/s}$

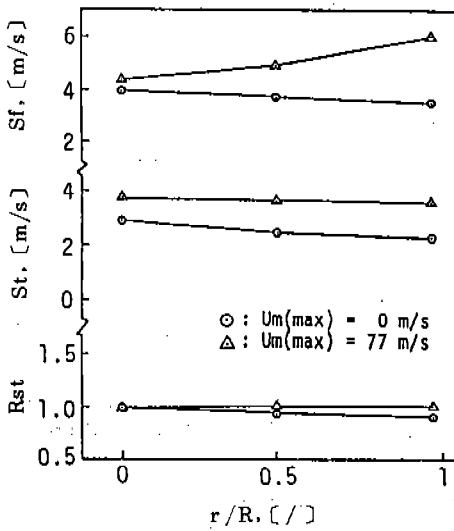


Fig. 14 Flame velocity S_f , burning velocity St and ratio of burning velocity R_{st} for ignition position in cases that $U_m(max) = 0.77$ m/s

는데 따른 화염전파거리의 증가로 인하여 함께 감소의 경향을 나타낸다. 그러나 선회류의 최대속도가 $U_m(max) = 77$ m/s 인 경우, 점화위치를 연소실의 중심으로부터 벽쪽으로 바꿀수록 S_f 는 현저히 증가하지만 St 는 큰 변화를 보이지 않는다. 점화위치를 연소실의 중심으로부터 벽쪽으로 바꿀수록 S_f 가 현저히 증가하는 것은 화염이 선회류 외층의 주류를 타고 전파하는데 따른 혼합기의 이동속도 증가에 기인한 것이다. 그리고 St 가 점화위치의 다름에도 불구하고 대체로 같은 값을 나타내는 것은 화염전파거리의 증가에 의한 영향과, 선회속도의 증가에 의한 공간적인 난류증가 및 각 점화위치에서의 국소적인 난류크기 차이의 영향이 서로 대등한 영향을 미치는 것에 의한 것이라 생각된다. 점화위치를 연소실의 중심으로부터 벽쪽으로 바꾸면 연소속도는 연소속도비 R_{st} 에서 나타난 바와 같이 선회류가 없는 경우 약 7% 감소하지만, 선회류의 최대속도가 $U_m(max) = 77$ m/s의 경우에는 거의 일정함을 나타낸다. 이러한 결과로부터 선회류가 있는 연소실에서 연소를 촉

진시키기 위하여서는 화염전파거리가 최소이며 또한 편심선회류가 형성되는 점화위치를 선택하는 것이 바람직한 것을 알 수 있다.

5. 결론

점화위치에 대한 비정상 선회류 및 화염전파 거동을 파악함으로써 연소에 미치는 점화위치의 영향을 파악할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 선회류는 초기에 선회중심이 연소실의 중심으로부터 다소 편심되어 있는 편심선회류를 나타내지만, 시간의 경과에 따라 선회중심이 연소실 중심과 일치하는 강제와류인 선회류로 된다.

(2) 열선풍속계에 의한 유속의 측정결과로부터 선회류의 선회속도를 구할 수 있었으며, 선회속도는 흡입압력의 증가에 의하여 증가하지만 곧 감소하여 흡입후 20 ms 후에는 200 rad/s 정도로 거의 일정하다. 그리고 선회류내에 생성되는 난류는 유속의 증가에 따라 증가한다.

(3) 선회류가 있는 연소실내의 연소에 미치는 점화위치의 영향은 화염전파거리와 점화시점의 유동상태에 의존한다.

(4) 점화위치를 연소실의 중심으로부터 벽쪽으로 가져가면 선회류가 없는 경우는 최고연소압력이 점차 감소하는 것으로 보아 화염전파거리가 연소를 지배하는 주요인이 되며, 선회류가 있는 경우는 어느 점화위치에 있어서도 최고연소압력이 거의 같은 것으로 보아 이 경우는 선회류가 연소를 지배하는 주요인 되는 것으로 판단된다.

(5) 선회류가 있는 연소실에서 연소를 촉진시키기 위하여서는 화염전파거리가 최소가 되는 점화위치를 선택하고 또한 편심선회류를 형성시키는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. 米村太刀夫, "高性能の追求", 山海堂, 1987, 8.

2. Isao Nagayama, Yasushi Araki and Yasuo Iioka, "Effects of Swirl and Squish on S. I Engine Combustion and Emission". SAE paper 770217, pp. 990 ~ 999.
3. G. E. Andrews, D. Brandly and S. B. Lwakabamba, "Turbulence and Turbulent Flame Propagation - A Critical Appraisal". Combustion and Flame 24, pp. 285 ~ 304, 1975.
4. David R. Lancaster, Roger B Krieger, Spencer C. Sorenson and Williams L. Hull, "Effects of Turbulence on Spark - Ignition Engine Combustion, SAE paper 760160. pp. 689 ~ 710.
5. 和栗雄太郎 外 4, "シリンダ内燃焼速度に及ぼすスワールと亂れの影響," 日機講論集, No. 970 - 6. p. 107. 1974-4.
6. 李鍾泰, 齊間 厚, "容器内の燃焼(第1報 : 容器内の非定常流動について)", 日本大學理工學研究所所報, 第65號, pp. 13 ~ 29, 1985. 11.