

〈論 文〉

스윙유통장에 있어서 연소속도에 미치는 난류특성의 영향에 관한 연구

이상준* · 이종태** · 이성열**

(1994년 10월 1일 접수)

A Study on the Influence of Turbulence Characteristics on Burning Speed in Swirl Flow Field

Sang Joon Lee, Jong Tai Lee and Songyol Lee

Key Words : Turbulent Burning Speed(난류연소속도), Turbulence Intensity(난류강도), Turbulent Scale(난류스케일), Mass Burned Rate(질량연소율), Flame Area(화염면적), Burning Speed Ratio(연소속도비)

Abstract

Flow velocity was measured by use of hot wire anemometer. Turbulence intensity was in proportion to mean flow velocity regardless of swirl velocity. And integral length scale has proportional relation with swirl velocity regardless of measurement position. Turbulent burning speed during flame propagation which was determined by flame photograph and gas pressure of combustion chamber was increased with the lapse of time from spark and was decreased a little at later combustion period. Because of combustion promotion effect, turbulent burning speed was increased according to increase of turbulence intensity. Burning speed ratio i. e. ratio of turbulent burning speed(S_{BT}) to laminar burning speed(S_{BL}) was found out by use of turbulence intensity u' and integral length scale l_x , δ_L is width of preheat zone in laminar flame.

1. 서 론

최근의 기관 개발동향은 저배기, 고효율을 위한 일환으로 연소실내에 난류유동을 이용하고 있다.^(1,2) 난류유동을 스파크 점화기관의 연소실에 이용하기 위해서는 난류유동 화염과의 관계에 대한 이해가 요구된다.^(3,4) 연소실내의 화염은 난류화염속도로 전파되고, 난류화염속도는 난류연소속도와 이송속도의 합으로 표현되므로, 난류화염에 대한 해석을 하기 위해서는 우선 난류화염속도의 근본이

되는 난류연소속도에 대한 고찰이 필요하다.

난류연소속도와 난류유동의 관계에 대한 표현에 있어서 종전에는 난류의 세기인 난류강도만을 이용하였다. 그러나 연소과정은 난류유동중에 수반되는 난류의 세기 및 난류의 크기에 의해 좌우되므로, 이에 대한 상세한 해석을 하기 위해서는 난류강도 뿐만 아니라 난류스케일을 부가한 복합적 해석이 요구된다.

또한 기관에 있어서 연소과정이나 배기 가스의 조성을 예측하기 위해서는 난류연소속도에 대한 이해가 요구된다. 그러나 기관에 있어서 난류연소속도를 구하는 것은 용이하지 않으므로, 많은 연구자들은 선행 연구자들이 해석한 연소속도비 즉, 총류

*회원, 국립공업기술원, 산업기계과

**회원, 성균관대학교 기계공학과

연소속도에 대한 난류연소속도의 비를 이용하여 난류연소속도를 구한다.^(5,6)

따라서 본 연구에서는 이를 위하여 난류특성과 연소특성의 해석이 비교적 용이한 정적연소기를 대상으로 하여, 연료-공기 균일혼합기의 난류연소속도에 미치는 난류강도 및 난류스케일의 영향에 대한 연구를 하여 난류연소속도에 미치는 난류특성의 영향을 해석한다. 그리고 난류연소장에 있어서의 층류연소속도에 대한 난류연소속도의 비인 연소속도비를 구하여, 기관의 연소과정 해석시 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 전체적인 개략이다. 실험장치는 정적연소기, 예혼합기 제조장치, 압축기, 슬리덴장치, 데이터 측정장치 및 해석장치로 구성된다.⁽⁷⁾

Fig. 2는 정적연소기의 개략도이다. 정적연소기는 기관의 연소실을 고려하여 지름 80 mm, 높이 22 mm인 원통형으로 제작하였으며, 연소실 체적은 110.6 cm³이다. 정적연소기 외측에는 스파크플러그, 분사밸브, 배기밸브, 압력변환기 및 팬 히터를 설치하였으며, 측면에는 화염전파를 가시화하기 위하여 두께 19 mm의 경화유리를 설치하였다.

스파크플러그는 통상의 자동차용 점화플러그의 중심 선주 끝에 지름 2 mm의 황동선을 길게 연장하여, 연소실의 중앙에 점화위치를 잡도록 하였다. 스파크플러그의 전극 간극은 0.8 mm, 전극 선단의

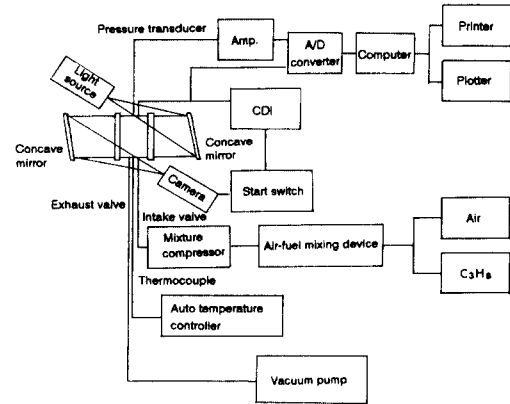


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

방전면은 평면으로 하였다.

또한 연소실의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 200 W 용량의 팬 히터 2개를 연소기의 외측 벽에 설치하였다. 이 때 연소기의 온도는 연소실의 내벽 면으로부터 3 mm 떨어진 위치에 열전대($\phi=1.6$ mm, K Type)를 삽입하여 확인하고, 자동온도조절장치와 팬 히터를 이용하여 일정하게 유지시켰다.

점화장치는 용량방전 점화장치(Capacity Discharge Ignitor)를 이용하였으며, 시간제어장치를 이용하여 점화시기를 제어할 수 있도록 하였다. 전원으로부터 1차 전압은 1차 승압기를 거쳐 4배로 승압된 후 정류기를 거쳐 콘덴서($474 \mu F \times 4$)에 저장된다. 저장된 전압은 점화시기에 해당되는 시기에 SCR(1200 V, 25 A)에 Trigger 신호를 줌으로써

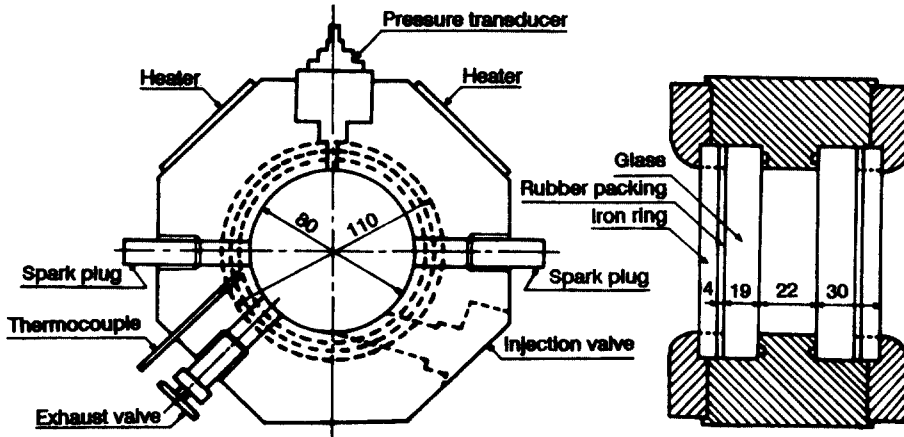


Fig. 2 Drawing of constant volume combustion chamber

2차 승압기를 거쳐 스파크를 일으키도록 하였다.

난류유동은 연소기의 점선방향으로 삽입된 분사밸브로 혼합기를 분사하여 스월유동을 조성함으로써 형성하였으며, 그리고 유동의 유동속도는 온도보상기가 내장되어 있는 정온도형 열선유속계(KANOMAX Model No. 7116)로 측정하였다. 열선프로브의 설치방향은 연소기의 반경방향에 직각 방향이다.

혼합기는 예혼합기 제조장치를 사용하여 연료공기당량비가 1.1이 되도록 연료-공기 예혼합기로 조성한다. 그리고 조성된 예혼합기를 3시간 이상 교반시켜 균일하게 만든 후, 대기압 상태로 압축장치에 저장한다. 그리고 압축장치를 사용하여 분사압력에 해당되는 압력으로 예혼합기를 압축시킨 후, 분사밸브를 통하여 연소실에 분사한다. 그리고 연소된 가스는 진공 펌프로 배출시킨다.

연소실내의 압력은 압력변환기(Kistler Co., 601 A type)로 측정하고, 이 데이터는 A/D변환기(Data translation Inc., 2812A, Sampling speed 100 kHz)를 통하여 컴퓨터에 입력되도록 하였다.

화염전파의 촬영에 사용된 슬리렌 장치는 지름 300 mm의 오목거울과 1 kW 출력의 크세논 광원(Xenon Lamp), 나이프 에지(Slit knife edge) 및 카메라로 구성된다. 촬영에는 통상의 카메라(Nikon FM2)를 사용하였다. 통상의 카메라를 사용하여 연소실내의 화염전파를 촬영하는 경우에는 한번 연소에 어느 한 순간의 연소상태만을 촬영할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 같은 조건하에서 시간을 지연시켜 반복 실험을 한 후에 점화후 시간의 경과에 따라 화염사진을 나열함으로써, 전 연소기간을 촬영할 수 있는 효과를 얻었다.

이러한 방법으로 화염전파를 가시화하기 위해서는 매 실험마다의 재현성이 있어야 하므로, 다수 실험에 의해 구한 순간 압력과 앙상블 평균 압력과의 차의 최고치로 재현성을 평가하였다. 이러한 최고치는 약 5% 정도로서, 매 실험마다의 재현성에 문제가 없는 것으로 판단하였다.

그리고 난류특성은 스월속도로 변화시켰다. 스월속도는 예혼합기의 분사압력을 2.5 bar, 3.0 bar, 3.5 bar 즉 3단계로 하여 변화시켰다. 그리고 분사량은 분사기간을 제어하여 분사압력이 변해도 일정하도록 하였다. 분사기간은 분사후 연소기내 압력이 1.5 bar가 되는 시기로 결정하였다. 실험에 사용된 혼합기는 연료공기당량비 1.1인 프로판-공기

예혼합기이며, 연소실내의 초기 압력과 초기 온도는 1.5 bar, 313 K로 일정하도록 하였다. 그리고 점화시기는 예혼합기 분사 종료후 50 ms가 되는 시기이고, 화염 촬영시 카메라의 셔터속도는 1/4000초로 하였다. 그리고 실험 데이터는 각 실험 조건하에서 30회 측정하여 평균값을 사용하였다.

3. 스월유동의 난류특성

3.1 난류특성의 결정 방법

평균유동속도는 연소기내의 유동이 비정상 유동이므로, 다수 측정된 순간유동속도를 앙상블 평균유동속도(Ensemble Averaged Flow Velocity), $U(t)$ 로 결정하였다.⁽⁸⁾

스월속도 S_w 는 유동이 강제운동을 한다는 가정하에 공간적으로 측정된 유동속도로부터 다음과 같이 결정하였다.⁽⁹⁾

$$S_w = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \frac{U_p}{r_p} \quad (1)$$

여기서 N_p : 측정위치의 수

U_p : 임의 측정위치에서의 유동속도

r_p : 임의 측정위치와 중심과의 거리

유동중에 수반되는 난류의 세기인 난류강도 $u'(t)$ 는 순간유동속도 $U_i(t)$ 와 앙상블 평균유동속도 $U(t)$ 와의 차를 RMS값으로 정의하여 결정하였다.

$$u'(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [U_i(t) - U(t)]^2} \quad (2)$$

난류의 크기를 나타내는 난류스케일은 순간유동속도와 평균유동속도의 차인 변동속도 및 난류강도로 표현되는 적분 난류스케일로 나타낸다.^(10,11) 적분 난류스케일은 적분 시간스케일(Integral time scale)과 적분 공간스케일(Integral length scale)로 구분된다.

적분 시간스케일 l_t 는 식 (3)과 같이 자기상관계수(Auto correlation coefficient, $R_t(t)$)를 이용하여 구한다.

$$l_t = \int_0^{\infty} R_t(t) dt \quad (3)$$

$$\text{여기서 } R_t(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{u_i(t_0) \cdot u_i(t_0+t)}{u'(t_0) \cdot u'(t_0+t)}$$

u : 변동속도(= $U_i - U$)

t_0, t : 기준 시간, 임의 시간

그리고 적분 공간스케일 l_x 는 적분 시간스케일의 경우와 같은 방법으로 임의의 시간에서 측정위치의 변화에 따른 변동속도와 난류강도로 표현된다. 그러나 이 경우 동시에 2지점에서 유동속도를 측정해야 하므로, 본 연구에서는 Taylor가 제시한 가설을 이용하였다.

$$l_x = U \cdot l_t \quad (4)$$

3.2 난류특성

Fig. 3은 각각의 분사압력에 대한 유동속도를 공간적으로 나타낸 것이다. 이 때의 유동속도의 크기는 절대치를 나타낸 것이고, 방향을 의미하지 않는다. 그리고 측정시기는 스웰유동특성과 연소과정과의 해석에 있어서, 점화시기에서의 난류유동 특성이 연소과정에 큰 영향을 미칠 것이므로, 분사종료 후 50 ms를 대표시간으로 설정하였다. 그림에

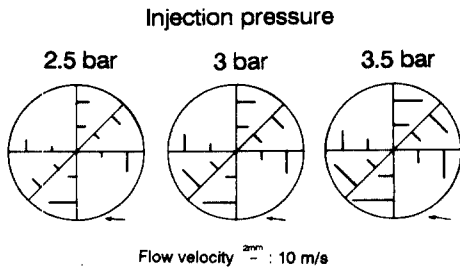


Fig. 3 Flow velocity distribution in constant volume vessel at each injection pressure

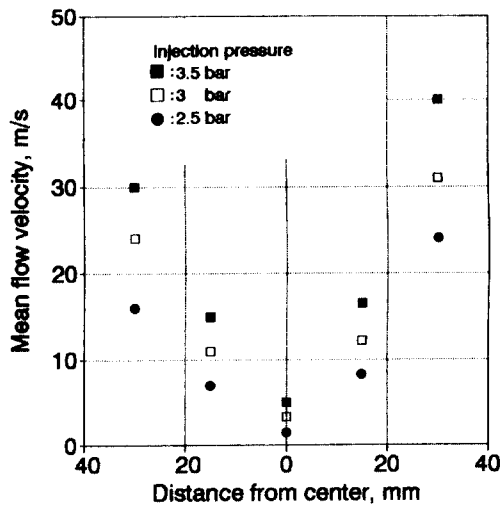


Fig. 4 Mean flow velocity as a function of distance from center at each injection pressure

나타난 바와 같이 유동속도는 연소기의 중심으로 부터 외측으로 갈수록 증가하고 있는 스웰유동의 속도분포를 나타내고 있다. 그리고 각 측정위치에 있어서의 유동속도는 분사압력이 증가함에 따라 전체적으로 증가하는 경향이다.

Fig. 4는 연소실내의 평균유동속도를 일례로 나타낸 것이다. 이 때 횡축의 거리가 0 mm인 것은 정적연소기의 중심을 나타낸다. 평균유동속도는 연소기의 중심에서 벽면으로 갈수록 증가한다. 또한 유동속도가 최저가 되는 스웰유동의 중심과 연소기의 중심은 일치하지 않고 있으나, 속도분포는 유동속도가 최저인 지점을 중심으로 대체로 대칭을 이루고 있으므로 연소기내에 형성된 스웰유동이 강제운동을 하는 것이라 판단할 수 있다. 따라서 비정상 스웰유동장의 스웰속도는 유동이 강제적으로 스웰운동을 하며, 각 측정위치에서 측정된 유동속도가 연소기의 반경에 접선 방향인 것으로 간주하여, 식 (1)로부터 결정할 수 있다. 스웰속도는 분사종료 후 50 ms의 시점에 대하여 분사압력이 2.5 bar일 때 400 rad/s, 3.0 bar일 때 650 rad/s 그리고 3.5 bar일 때 900 rad/s로써, 추후 이 값을 스웰속도의 대표값으로 사용한다.

Fig. 5는 각 지점에서 측정된 난류강도를 스웰속도의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 난류강도는 스웰속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향이다. 또한 난류강도는 정적연소기의 외측으로 갈수록 증가하며, 그 증가하는 정도는 스웰속도가 커

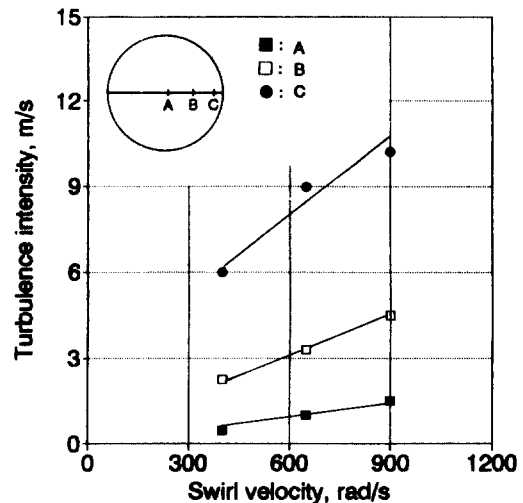


Fig. 5 Turbulence intensity as a function of swirl velocity at each measurement position

질수록 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 연소기내 형성된 유동이 강제운동을 함에 따라, 연소기의 외측으로 갈수록 유동속도가 증가하는데 기인하여, 평균유동속도와 난류강도는 스윙속도에 관계 없이 직선적인 비례 관계이며, 평균유동속도에 대한 난류강도의 비인 상대난류강도는 0.3 정도로 일정하다.

Fig. 6은 각 스윙속도에 있어서 적분 시간스케일과 적분 공간스케일을 측정위치에 대하여 나타낸 것이다. 적분 시간스케일은 연소기 중심으로부터 외측으로 갈수록 작아지며, 또한 스윙속도의 증가

에 따라 전반적으로 작아지는 경향이다. 적분 시간스케일은 난류 eddy가 시간의 경과에 따라 eddy의 고유성을 잃거나 소멸되는데 소요되는 시간으로써, 스윙속도의 증가에 따른 유동속도의 증가로 감소되는 것을 알 수 있다.

적분 공간스케일은 연소기 중심으로부터 외측으로 갈수록 증가하는 경향이고, 스윙속도가 증가함에 따라 공간적으로 큰 값을 나타낸다. 그리고 적분 시간스케일의 경우와는 달리 연소기 외측으로 갈수록 스윙속도의 증가에 따른 차이가 커진다. 적분 시간스케일은 난류 eddy의 고유성을 잃는데 소요되는 거리로서, 스윙속도의 증가에 따른 유동속도가 증가하면 증가한다.

Fig. 7은 난류강도의 변화에 따른 적분 시간스케일과 적분 공간스케일을 각각의 스윙속도에 대해 나타낸 것이다. 적분 시간스케일은 스윙속도에 관계 없이 난류강도가 증가함에 따라 감소하는 경향으로써 반비례 관계를 갖는다. 이와 같은 경향은 전술한 바와 같이 난류강도는 유동속도에 비례하고, 적분 공간스케일은 유동속도에 반비례하는데 기인하는 것이다. 그리고 적분 공간스케일은 전반적으로 스윙속도에 관계 없이 난류강도에 선형적으로 비례하는 경향이며, 이와 같은 경향은 적분 시간스케일의 경우와 유사한 원인에 기인하는 것으로 판단된다.

그림에 나타난 바와 같은 난류강도와 난류스케일의 관계로부터, 추후 연소과정의 해석시 난류강도와 난류스케일의 영향을 복합적으로 밝힐 필요가 있다.

4. 연소속도

연소속도 S_B 는 미연혼합기의 질량보존식을 이용하여 다음과 같은 방법으로 구하였다.⁽¹²⁾

$$S_B(t) = \frac{dM/dt(t)}{A_f(t) \cdot \rho_u(t)} \quad (5)$$

이와 같은 방법으로 시간 경과에 따른 연소속도를 구하기 위해서는 연소기간중 임의 시각에 있어서의 질량연소율(Mass burned rate, dM/dt), 화염면적(Flame area, A_f) 및 미연혼합기의 밀도(Density of unbured mixture, ρ_u)가 구해져야 한다. 따라서 본 연구에서는 각 항목들을 구하기 위해 연소실내의 압력을 채취하였으며, 동시에 화염

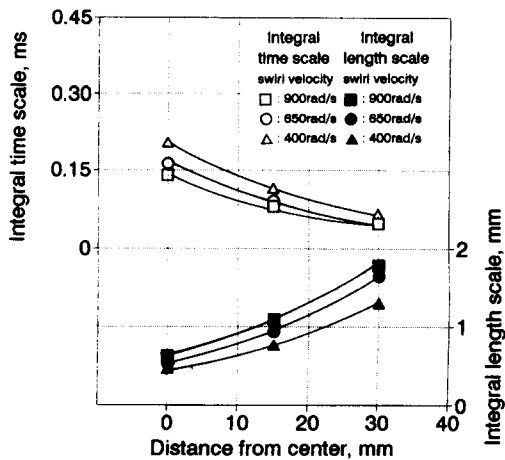


Fig. 6 Integral time scale and Integral length scale as a function of distance from center of constant volume vessel at each swirl velocity

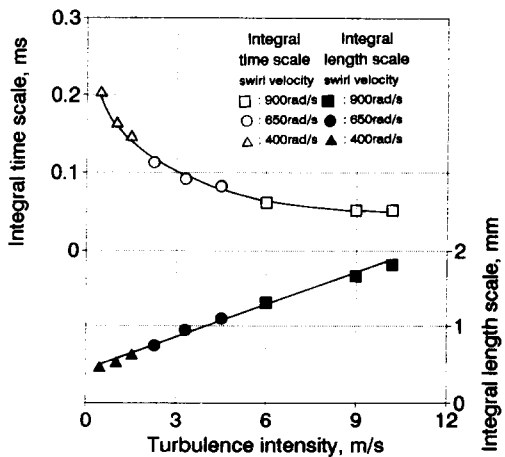


Fig. 7 Integral time scale and Integral length scale as a function of turbulence intensity at each swirl velocity

전파를 촬영하였다.

4.1 질량연소율

단위 시간당 연소되는 혼합기의 질량인 질량연소율을 dM/dt 은 연소에 의해 발생하는 발생열량이 연소된 질량과 비례 관계에 있다는 가정으로부터 열발생률(Heat release rate) dQ/dt 을 이용하여 구한다.⁽¹³⁾ 질량연소율을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\frac{dM}{dt}(t) = \frac{d(M_t \cdot X(t))}{dt} \quad (6)$$

여기서 $X(t) = \int_a^t \frac{dQ}{dt} dt / \int_a^b \frac{dQ}{dt} dt$

- M_t : 혼합기의 총량
- a : 연소 시작 시기
- b : 연소 종료 시기

열발생률 dQ/dt 은 시간 변화에 대한 열발생량의 변화량으로서, 연소실내 압력을 이용하여 구하였다. 열발생률을 구하기 위한 가정은 다음과 같다.

- a) 연소실내의 압력과 조성은 균일하다.
- b) 미연혼합기 및 기연혼합기는 얇은 화염면에 의해 구분된다.
- c) 미연혼합기는 폴리트로픽 압축된다.

Fig. 8은 점화후 시간 경과에 따른 질량연소율을 난류강도의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 이 경우 점화위치는 중심점화이며, 난류강도는 각 측정위치에서 측정한 연소기간 중의 난류강도를 평균한 것이다. 질량연소율은 시간이 경과함에 따라 증가한 후 감소의 경향으로서, 연소 초기부분에서는 완만한 증가 기울기를 갖다가 화염이 점차 전파함에 따라 급격히 증가한 후, 연소 말기부분에는 감소 경향이다.

난류강도가 증가함에 따라 질량연소율의 최고값이 커지며, 최고값이 나타나는 시기가 빨라지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 난류강도의 증가에 따라 연소가 촉진되는 데 기인하는 것으로 판단된다. 연소기간에 대한 최고 질량연소율의 발생시기는 난류강도의 대소에 상관 없이 0.84 정도이다. 이로부터 총 혼합기 질량의 84% 정도 연소될 때 연소가 가장 활발한 것을 알 수 있다.

이와 같은 난류특성이 질량연소율에 미치는 영향을 파악하기 위하여 질량연소율을 기초로 하여 구한 연소기간을 난류강도의 변화에 대하여 Fig. 9에 나타낸다. 연소기간은 혼합기가 연소된 질량비

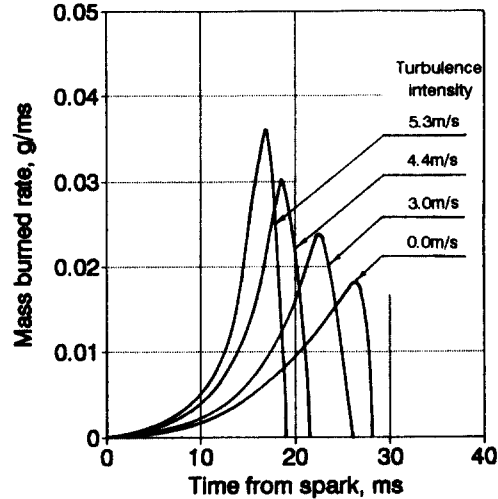


Fig. 8 Mass burned rate as a function of time from spark at each turbulence intensity in case of central spark

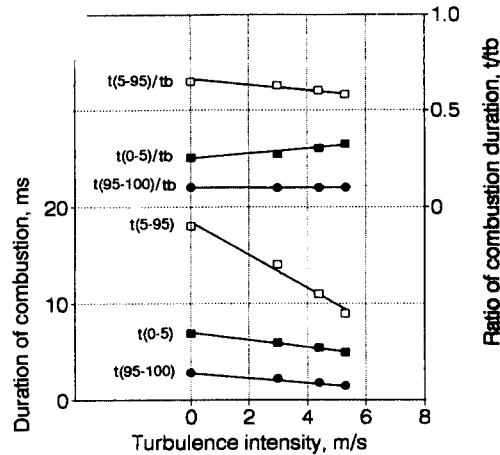


Fig. 9 Duration of combustion and the ratio of combustion duration as a function of turbulence intensity

- t(0-5) : period of early burning
- t(5-95) : period of rapid burning
- t(95-100) : period of after burning
- tb : Duration of combustion

를 %로 구분하여, 초기연소기간 $t(0\sim5)$, 주연소기간 $t(5\sim95)$ 그리고 후연소기간 $t(95\sim100)$ 으로 나타내며, 또한 각 연소기간을 전 연소기간(t_b)에 대한 비로 나타낸다.

난류강도가 증가함에 따라 각 연소기간은 모두 감소하는 경향을 나타내며, 특히 주 연소기간이 감

소하는 정도가 크다. 그리고 $t(5 \sim 95)/t_b$ 는 전 연소기간에 대한 주 연소기간의 비율 의미하는 것으로써, 난류강도가 증가함에 따라 감소하는 경향이 있다. 그리고 난류강도가 증가함에 따라 초기연소기간에 대한 비는 약간 증가하며, 후연소기간에 대한 비는 거의 변화가 없다.

이와 같은 결과로부터 난류강도의 증가에 따른 연소기간의 감소는 주 연소기간의 감소가 지배적인 인자인 것으로 판단된다.

4.2 화염 면적

Fig. 10은 시간의 경과에 따른 슐리렌 화염사진을 각 스윙속도에 대하여 나타낸 것이다. 화염사진은 전술한 바와 같이 통상의 카메라로 촬영한 것으로써, 고속 카메라로 촬영한 것과 같은 효과를 나타내고 있다. 이로부터 정적연소기에 의한 실험의 높은 재현성에 의하여 통상의 카메라를 사용해도 화염전파의 촬영이 가능하다는 것을 알 수 있다.

화염은 스윙속도가 증가함에 따라 최대 화염 도달 거리에 닿는 시기도 점차 빨라지는 것을 알 수 있다. 그리고 화염이 전파하는 형상은 층류유동장인 경우에는 점화위치로부터 원형으로 전파하는 원형 형상의 화염을 나타낸다. 그리고 난류유동장의 경우에는 난류유동의 영향으로 인해 화염이 주름형상으로 되나 대체로 원형 형상으로 전파하는 것을 알 수 있다.

난류연소장에 있어서 화염면적은 화염사진에 나타난 바와 같이 난류의 영향으로 인하여 변형되므로 결정하기가 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 슐리렌 촬영하여 얻은 화염사진으로부터 화염면적을 결정하였다.

Fig. 11은 난류강도의 변화에 따른 화염면적은 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 이 경우 화염면적은 화염사진으로부터 구하였고, 점화위치는 중심 점화위치이다. 화염면적은 점화위치가 연소실의 중앙이므로, 화염이 최대 화염도달거리에 닿을 때까지 증가한다. 그리고 난류강도가 증가함에 따라 화염면적이 최대가 되는 시기도 빨라진다.

4.3 미연혼합기의 밀도

미연혼합기의 밀도 ρ_u 는 미연혼합기가 연소과정 중 화염면에 의해 폴리트로픽 압축된다는 가정으로부터, 화염사진과 연소실내의 압력을 이용하여 열역학적 상태방정식 $P \cdot \rho_u^{-n} = \text{const.}$ 으로부터 구한

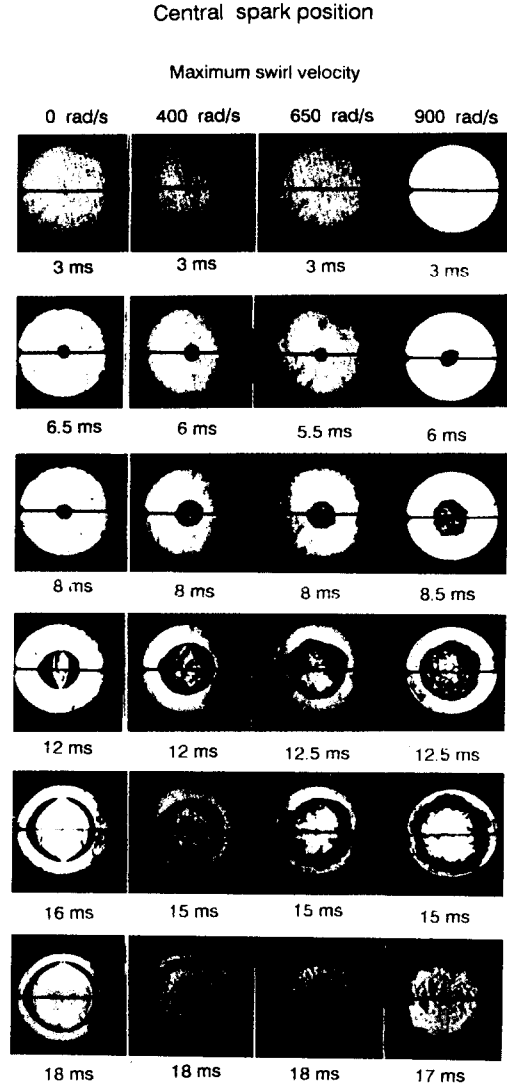


Fig. 10 Schlieren photographs of the flame propagation at each swirl velocity

다. 이와 같은 방법으로 미연혼합기의 밀도를 결정하기 위해서는 폴리트로픽 지수가 결정되어야 한다. 폴리트로픽 지수 n 은 약 1.28~1.34 정도의 값으로 연소가 진행됨에 따라 약간 감소하며, 난류강도가 증가할수록 전반적으로 약간 작은 값을 갖는다.

이와 같이 결정된 화염전파중의 폴리트로픽 지수를 이용하여, 임의의 시각에 있어서의 미연혼합기 밀도 ρ_u 는 $\rho_u(t) = \rho_{u0} \cdot \{P(t)/P_0\}^{1/n(t)}$ 으로 결정하였다.

Fig. 12는 난류강도의 변화에 따른 미연혼합기의 밀도를 나타낸 것이다. 미연혼합기의 밀도는 연소가 진행됨에 따라 화염전파에 의한 미연혼합기의 압축으로 인해 증가하는 경향이다. 그리고 난류강도가 증가할수록 미연혼합기의 밀도는 전반적으로 큰 값을 가지며, 이는 난류강도의 증가로 인한 화염의 빠른 전파에 기인하는 것이다.

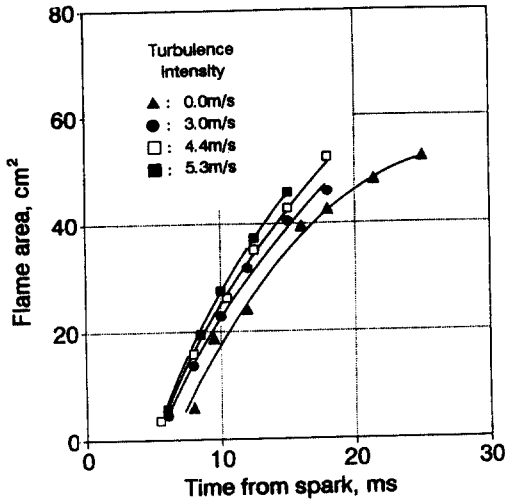


Fig. 11 Flame area as a function of time from spark at each turbulence intensity in case of central spark

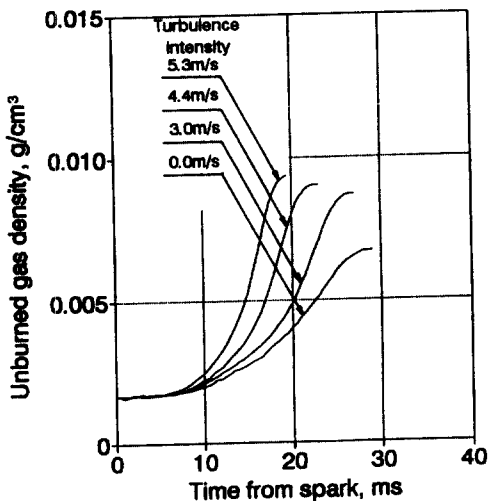


Fig. 12 Unburned gas density as a function of time from spark at each turbulence intensity in case of central spark

5. 난류연소속도에 미치는 난류특성의 영향

Fig. 13은 화염전파중의 난류연소속도를 난류강도의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 이 경우 연료 공기당량비는 1.1이다. 난류연소속도는 연소가 진행됨에 따라 증가하는 경향을 나타내며, 연소 말기 시기에는 약간 감소한다. 이와 같은 경향은 전술한 바와 같이 시간이 경과함에 따라 질량연소율은 급격히 증가한 후 감소하고, 화염면적과 미연혼합기의 밀도는 계속 증가하는데 의한 것이다.

그리고 난류연소속도는 난류강도가 0 m/s인 층류연소장의 경우 보다 난류연소장의 경우가 큰 값을 나타낸다. 그리고 난류강도가 증가할수록 난류연소속도는 전반적으로 큰 값을 나타낸다. 이와 같은 경향은 난류유동중에 수반되는 난류특성의 연소 촉진효과에 기인하는 것으로서, 난류강도가 증가함에 따른 질량연소율의 증가 영향이 화염면적 및 미연혼합기 밀도의 증가 영향보다 큰데 기인하는 것으로 판단된다.

따라서 난류연소속도와 난류특성과의 관계를 파악하기 위해서는, 난류연소속도에 미치는 난류강도와 난류스케일의 영향에 대한 고찰이 필요하다.

Fig. 14는 난류강도와 연소속도와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 난류강도는 연소실내에서 공간

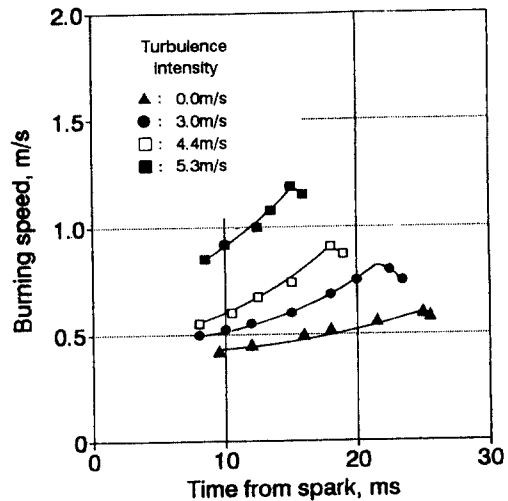


Fig. 13 Burning speed as a function of time from spark at each turbulence intensity in case of central spark

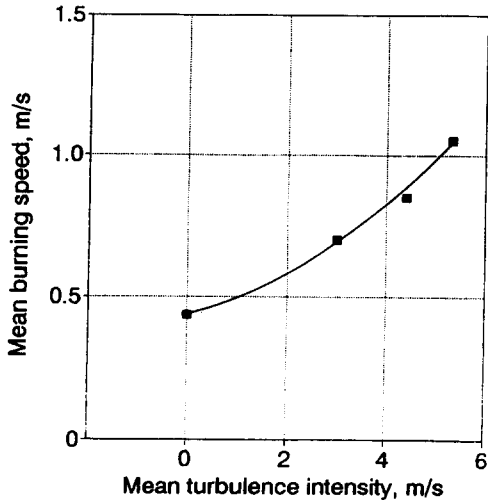


Fig. 14 Mean burning speed as a function of mean turbulence intensity in case of central spark

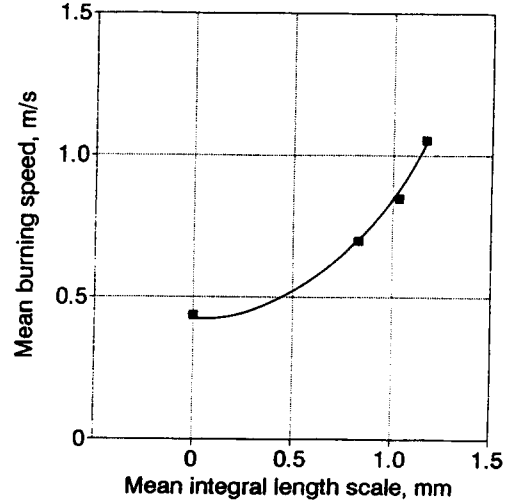


Fig. 15 Mean burning speed as a function of mean integral length scale in case of central spark

적으로 측정된 연소기간 중의 난류강도를 평균한 것이다.

연소속도는 난류강도가 증가함에 따라 증가하는 경향이다. 이와 같은 경향은 일반적으로 알려진 바와 같이 난류의 증가에 따른 반응대에 있어서의 연소촉진 효과에 의한 영향으로 판단된다. 즉 난류가 증가하면 반응대에서 활성화 물질의 이동과 열전달이 증가되고 열전달 면적이 증가되어, 연소를 촉진시키는 역할을 하는데 기인하는 것으로 판단된다. 난류강도가 0 m/s~5.3 m/s로 변화함에 따라 연소속도는 0.4 m/s~1.1 m/s 정도의 값을 나타낸다.

Fig. 15는 적분 공간스케일과 연소속도와의 관계를 나타낸 것이다. 이 경우 적분 공간스케일은 연소기간 중의 적분 공간스케일을 시간적, 공간적으로 평균한 것이다.

적분 공간스케일이 증가함에 따라 연소속도는 난류강도의 경우와 유사하게 연소촉진효과에 의해 지수함수적으로 증가하는 경향이다. 적분 공간스케일이 0 mm~1.2 mm로 증가함에 따라 연소속도는 0.4 m/s~1.1 m/s 정도의 값을 나타낸다.

스파크 점화기관의 연소과정을 예측하는데 있어서 연소속도비는 난류유동에 지배적 영향을 받으므로, 난류특성과의 관계로 표현하고 있으며, 기관의 연소과정 해석에 있어서 기초적 자료로 사용된다. 본 연구의 경우와 같이 적분 공간스케일이 큰 난류연소장에 있어서의 화염은 주름 형태로 되며, 이와 같은 난류 화염의 형상은 원추형으로 간주할 수 있

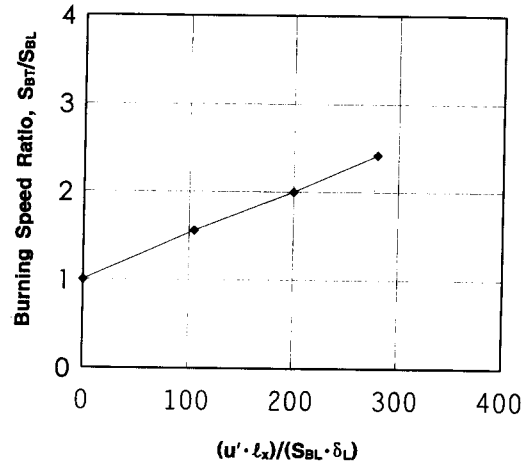


Fig. 16 Ratio of turbulent burning speed to laminar burning speed as a function of $(u' \cdot l_x) / (S_{BL} \cdot \delta_L)$

다. 이와 같은 국부적인 화염의 형상으로부터 화염이 에디를 통과하는데 소요되는 시간은 에디의 크기, 즉 적분 공간스케일 l_x 에 비례하고, 이 화염 요소는 난류강도 u' 에 비례하여 이동되므로, 주름진 화염의 깊이는 $(u' \cdot l_x) / (S_{BL} \cdot \delta_L)$ 에 비례한다는 가정으로부터 연소속도비에 대한 해석을 한다.

이와 같은 이론적 해석으로부터 난류강도 및 적분 공간스케일과 연소속도비의 관계식을 확립한다. 여기서 층류화염의 예열대 두께 δ_L 는 열이론을 기초로 하여 구하였다.

Fig. 16은 연소속도비와 난류특성과의 관계이다. 그림에 나타난 바와 같이 연소속도비는 난류강도, 난류스케일 및 층류화염의 예열대 두께를 이용한 관계식과는 직선적인 비례 관계가 있으며, 이와 같은 관계로부터 연소속도비는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{S_{BT}}{S_{BL}} = 1 + 0.0046 \frac{u' \cdot l_x}{S_{BL} \cdot \delta_L} \quad (7)$$

이와 같은 관계식으로부터 추후 연소과정 해석시 구하기가 용이하지 않은 난류연소속도의 결정이 용이해졌다. 따라서 이와 같은 관계식으로부터 난류유동장에 있어서의 난류특성을 수단으로 하여 난류연소속도를 결정할 수 있으며, 추후 연소과정 및 배기조성을 예측하기 위한 시뮬레이션을 행하고자 할 때 기초자료로도 제공된다.

6. 결 론

I. 정적연소기내에 스윙유동을 형성하여 열선유속계로 유동속도를 측정함으로써, 다음과 같은 스윙유동특성을 파악하였다.

난류강도는 스윙속도에 관계 없이 평균유동속도에 직선적 비례 관계이다. 그리고 평균유동속도에 대한 난류강도의 비인 난류생성률을 나타내는 상대난류강도는 일반적으로 알려진 바와 같이 0.3 정도이다. 또한 적분 시간스케일 및 적분 공간스케일은 측정위치에 상관 없이 스윙속도와 반비례 및 선형적 비례 관계이다. 난류강도와 적분 공간스케일은 스윙속도에 상관 없이 선형적 비례 관계이다. 따라서 추후 연소과정 해석시 난류스케일과 난류강도의 복합적인 해석이 요구된다.

II. 난류연소속도에 미치는 난류특성의 영향을 파악하기 위하여 정적연소기를 대상으로 하여 난류강도 및 난류스케일이 난류연소속도에 미치는 영향에 대한 해석을 하였다.

화염 사진과 연소실내의 압력을 이용하여 결정한 화염전파중의 난류연소속도는 점화후 시간이 경과함에 따라 증가하는 경향이 있으며, 연소 종료 시기에는 약간 감소한다.

질량연소율이 최대가 되는 시기는 난류강도에 상관 없이 연소기간의 84% 정도의 시기이다. 난류강도의 증가에 따른 연소기간의 감소는 주 연소기간의 감소가 지배적인 것으로 판단된다. 그리고 미연

혼합기의 밀도는 연소가 진행됨에 따라 증가하는 경향이다.

난류연소속도는 난류강도와 난류스케일의 증가에 따른 연소촉진효과에 의하여 증가하며, 층류연소속도에 대한 난류연소속도의 비인 연소속도비는 난류강도와 난류스케일로 표현한 결과 연소속도비 $S_{BT}/S_{BL} = 1 + \{0.0046(u' \cdot l_x) / (S_{BL} \cdot \delta_L)\}$ 의 관계식을 얻었다. 여기서 u' 는 난류강도, l_x 는 적분 공간스케일, 그리고 δ_L 는 층류화염의 예열대 두께이다.

참고문헌

- (1) Hiroto, T., Nagayama, I., Kobayasi, S. and Yamamasu, M., 1981, "Study of Induction Swirl in a Spark Ignition Engine," *SAE Paper*, No. 810496, pp. 1851~1868.
- (2) 이상준, 한성빈, 정연중, 이종태, 이성열, 1994, "연소실내의 난류강도에 미치는 각종 인자의 영향," 대한기계학회논문집, 제18권 제3호, pp. 793~804.
- (3) Monaghan, M. L. and Pettifer, H. F., 1981, "Air Motion and Its Effect on Diesel Performance and Emissions," *SAE Paper*, No. 810255, pp. 1119~1135.
- (4) 浜本嘉輔, 富田榮二, 泉政明, 1986, "密閉容器内均一混合氣の燃焼に及ぼす旋回亂流の效果," 日本機械學會論文集(B編), 53卷 489號, pp. 1627~1634.
- (5) Milton, B. E. and Keck, J. C., 1984, "Laminar Burning Velocities in Stoichiometric Hydrogen and Hydrogen-Hydrocarbon Gas Mixtures," *Combustion and Flame*, Vol. 58, pp. 13~22.
- (6) Liu, D. D. S. and Macfarlane R., 1983, "Laminar Burning Velocities of Hydrogen-Air and Hydrogen-Air-Steam Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 49, pp. 59~71.
- (7) 이상준, 한동호, 김문현, 이종태, 이성열, 1992, "층류화염전파중의 연소실 벽면으로의 열손실," 대한기계학회논문집, 제16권 제7호, pp. 1398~1407.
- (8) Witze, P. O., 1977, "Measurements of the Spatial Distribution and Engine Speed Dependence of Turbulent Air Motion in an I. C. Engine," *SAE Paper*, No. 770220, pp. 1012~1023.

- (9) 八田桂三, 淺沼強, 松木正勝, 1979, “內燃機關計測ハンドブック,” 朝倉書店, pp. 11~68, 270~278.
- (10) Hinze J. O., 1959, “*Turbulence and Introduction to Its Mechanism and Theory*,” McGraw Hill Book Co., pp. 85~95.
- (11) Fraser, R. A., Felton, P. G. and Bracco, F. V., 1986, “Preliminary Turbulence Length Scale Measurements in a Motored IC Engine,” *SAE Paper*, No. 860021, pp. 174~186.
- (12) Richard, S. B. and Melvin, G., 1956, “Correlation of Burning Velocity, Quenching Distances and Minimum Ignition Energies for Hydrogen-Oxygen-Nitrogen System,” *6th Symposium (International) on Combustion*, pp. 66~74.
- (13) 長尾不二夫, 1974, “內燃機關講義,” 第3次改作, 養賢堂, pp. 168~173.