

〈논 문〉

스윙유동장의 화염전파에 미치는 난류특성의 영향에 관한 연구

이상준* · 이종태** · 이성열**

(1995년 11월 13일 접수)

A Study on the Influence of Turbulence Characteristics on Flame Propagation in Swirl Flow Field

Sang Joon Lee, Jong Tai Lee and Songyol Lee

Key Words : Flame Propagation(화염 전파), Turbulent Flame Speed(난류화염속도), Turbulent Intensity(난류강도), Turbulent Scale(난류스케일), Transport Speed(이송속도), Flame Speed Ratio(화염속도비)

Abstract

Flow velocity was measured using a 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. Flame speed calculated by radius of visualized flame was increased and then decreased according to lapse of time from spark. Maximum flame speed was increased according to increase of turbulence intensity. Burning speed and flame transport effect increased with increase of swirl velocity, but ratio of burning speed to flame speed decreased with increase of swirl velocity. Mass fraction burned versus volume fraction burned was increased in proportion to the increase of turbulence intensity, caused by increase of combustion promotion effect according to increase of turbulence intensity and scale.

1. 서 론

최근 기관의 개발동향은 대기오염을 줄이기 위한 일환으로 회박 혼합기를 사용하는데, 이와 같은 방법은 연소불안정이나 출력저하를 초래하므로, 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 기관의 연소에 난류유동을 이용하고 있다.⁽¹⁻⁶⁾

기관의 연소실에 있어서 화염전파는 난류유동의 영향을 받아 난류화염이 되고, 난류화염속도는 연소속도와 이송속도의 합으로 표현된다. 따라서 난류유동을 연소실에 이용하기 위해서는 난류유동과 연소속도 및 이송속도와의 관계가 밝혀져야 한다.

통상 연소실내 난류유동속도가 증가하면 화염면이 증가되고, 화염 에디의 이동에 의해 화염의 형태가 변화된다고 하는 연구 보고⁽⁷⁾가 있는데, 이에 대한 세밀한 해석이 미흡하다.

따라서 본 연구에서는 난류특성 즉 난류강도, 난류스케일을 파악하고, 연소장에서의 화염속도, 화염면적과 화염전파 형상을 상세히 파악하여, 화염전파에 미치는 난류특성의 영향을 해석함으로써, 난류유동을 이용한 기관의 연소에 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 지름 80mm, 높이 22mm인 원통형으로 제작한 정적연소기의 개략도이다. 정적연소기 외측

*회원, 국립기술품질원 산업기계과

**회원, 성균관대학교 기계공학과

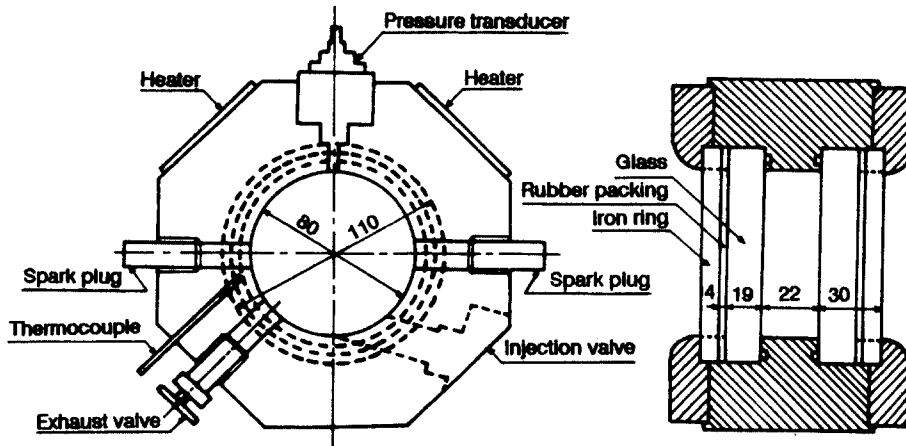


Fig. 1 Constant volume combustion chamber

에는 스파크플러그, 분사밸브, 배기밸브, 압력변환기 및 팬히터를 설치하였으며, 측면에는 화염전파를 가시화하기 위하여 두께 19mm의 경화유리를 설치하였다.

스파크플러그는 통상의 자동차용 점화플러그의 중심 선주 끝에 지름 2mm의 황동선을 길게 연장하여 사용하였다.

또한 연소실의 온도는 연소실의 내벽면으로부터 3mm 떨어진 위치에 삽입한 열전대, 400W 용량의 팬히터 및 자동온도조절장치를 이용하여 일정하게 유지시켰다.

Fig. 2는 실험장치의 전체적인 개략이다. 실험장치는 정적연소기, 점화장치, 예혼합기 제조장치, 가시화장치, 데이터 측정장치 및 해석장치로 구성

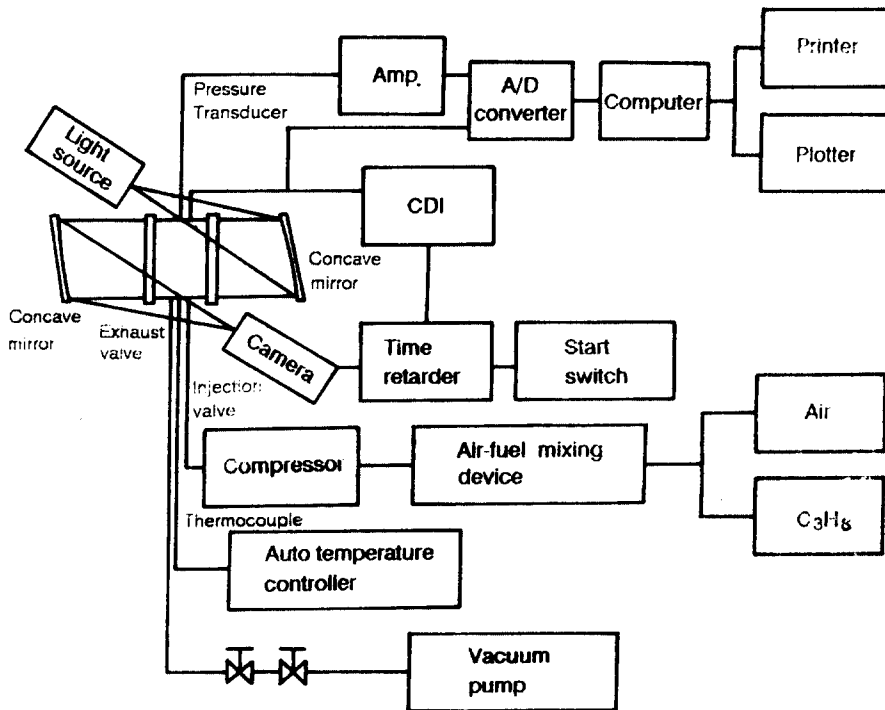


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

된다. 정적연소기는 전술한 바와 같다.

점화장치는 용량방전 점화장치(Capacity Discharge Ignitor)를 이용하였으며, 시간제어장치를 이용하여 점화시기를 제어할 수 있도록 하였다. 권선으로부터 1차 전압은 1차 승압기를 거쳐 4배로 승압된 후 정류기를 거쳐 콘덴서($474\mu\text{F}\times 4$)에 저장된다. 저장된 전압은 점화시기에 해당되는 시기에, SCR(1200V, 25A)에 트리거 신호를 줌으로써 2차 승압기를 거쳐 스파크를 일으키도록 하였다.

화염전파의 가시화에 사용된 솔리덴 장치는 지름 300mm의 오목거울과 1kW 출력의 크세논 광원(Xenon Lamp), 나이프 에지 및 카메라로 구성된다. 촬영에는 통상의 카메라(Nikon FM2)를 사용하였다. 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, 전연소기간을 촬영할 수 있는 효과를 얻었다.

이러한 방법으로 화염전파를 가시화하기 위해서는 매 실험마다의 재현성이 있어야 하므로, 다수 측정된 연소실내의 압력으로부터 최고압력변동(P_{fm}) $P_{fm}(t) = |P_i(t) - P_E(t)|_{MAX}$ 을 평가하였는데, 여기서 P_i 는 임의 측정에 있어서의 압력값, P_E 는 앙상블 평균압력이다. P_{fm} 는 점화후 시간의 경과에 따라 약간 변화하나, 최대치가 약 5% 정도이므로, 매 실험마다의 재현성에는 문제가 없는 것으로 판단하였다.^(6,9)

난류유동은 연소기의 점선방향으로 삽입된 분사밸브로 혼합기를 분사하여 스월유동을 조성함으로써 형성하였다. 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 해당하는 압력으로 예혼합기를 압축시킨 후, 분사밸브를 통하여 연소실에 분사한다. 그리고 연소된 가스는 진공 펌프로 배출시킨다.

난류특성은 스월속도로 변화시켰다. 스월속도는 예혼합기의 분사압력을 2.5bar, 3.0bar, 3.5bar 즉 3단계로 하여 변화시켰다. 점화위치는 연소실의 중앙 위치, 중앙에서 반지름의 1/2 떨어진 위치,

벽면으로부터 2mm 떨어진 위치 등 세 지점으로 하고, 이후 각 점화위치를 중심점화(Central spark), 0.5R 점화(0.5R spark), 벽면점화(Side spark)라 칭한다. 연소실내의 초기 압력과 초기 온도는 1.5 bar, 313K로 일정하도록 하였다. 그리고 점화시기는 예혼합기 분사 종료후 50ms이고, 화염 촬영시 카메라의 셔터속도는 1/4000초로 하였다.

그리고 실험 데이터는 각 실험 조건하에서 30회 이상 측정하여 평균값을 사용하였다.

3. 스월유동의 난류특성

Fig. 3은 각각의 분사압력에 대한 유동속도를 공간적으로 나타낸 것이다. 이때의 유동속도는 열선 유속계를 이용하여 측정하였다. 유동속도는 앙상블 평균유동속도이며, 절대치를 나타낸 것이고, 방향을 의미하지 않는다. 그리고 측정시기는 스월유동 특성과 연소과정과의 해석에 있어서, 점화시기에서의 난류유동 특성값이 연소과정에 큰 영향을 미칠 것이므로, 분사종료 후 50ms를 대표시간으로 설정하였다. 그림에 나타난 바와 같이 유동속도는 연소기의 중심으로부터 외측으로 갈수록 증가하고 있는 스월유동의 속도분포를 나타내고 있다. 그리고 각 측정위치에 있어서의 유동속도는 분사압력이 증가함에 따라 전체적으로 증가하는 경향이다.

Fig. 4는 연소실내의 평균유동속도를 일례로 나타낸 것이다. 이때 그래프 횡축의 거리가 0mm인 것은 정적연소기의 중심을 나타낸다. 평균유동속도는 연소기의 중심에서 벽면으로 갈수록 증가한다. 또한 유동속도가 최저가 되는 스월유동의 중심과 연소기의 중심은 일치하지 않고 있으나, 속도분포는 유동속도가 최저인 지점을 중심으로 대체로 대칭을 이루고 있으므로 연소기내 형성된 스월유동이

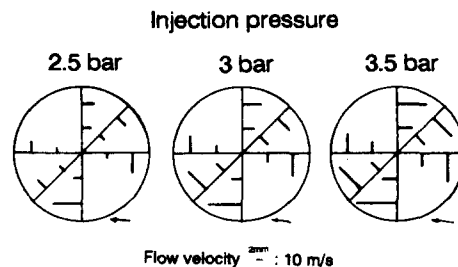


Fig. 3 Flow velocity distribution in constant volume vessel at each injection pressure.

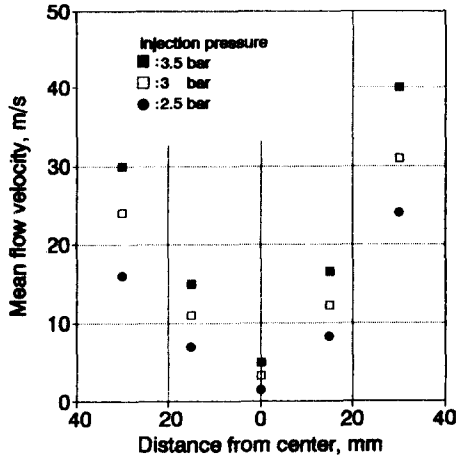


Fig. 4 Mean flow velocity as a function of distance from center at each injection pressure.

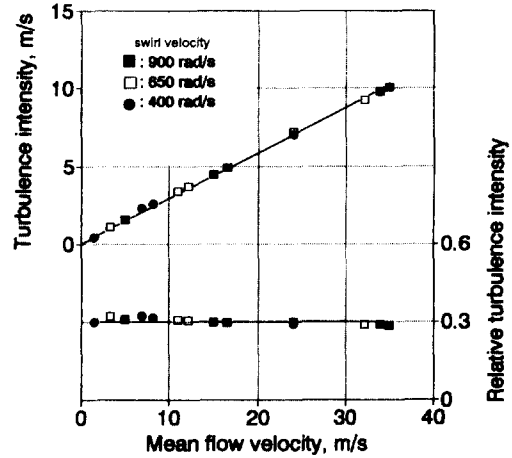


Fig. 5 Turbulence intensity and relative turbulence intensity as a function of mean flow velocity at each swirl velocity.

강체운동을 하는 것이라 판단할 수 있다. 따라서 비정상 스윙유동장의 스윙속도는 유동이 강체적으로 스윙운동을 하며, 각 측정위치에서 측정된 유동속도가 연소기의 반경에 접선 방향인 것으로 간주하여, 임의의 유동속도 측정위치에서 연소기 중심으로부터의 거리에 대한 유동속도의 비로 결정하였다.⁽⁸⁾ 스윙속도는 분사종료후 50ms의 시점에 대하여 분사압력이 2.5bar일 때 400rad/s, 3.0bar일 때 650rad/s, 그리고 3.5bar일 때 900rad/s로써, 추후 이 값을 스윙속도의 대표값으로 사용한다.

Fig. 5는 각 지점에서 측정된 난류강도를 스윙속도의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 난류강도는 스윙속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향이다. 또한 난류강도는 정적연소기의 외측으로 갈수록 증가하며, 그 증가하는 정도는 스윙속도가 커질수록 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 평균유동속도와 난류강도는 스윙속도에 관계 없이 직선적인 비례관지이며, 평균유동속도에 대한 난류강도의 비인 상대난류강도는 0.3 정도로 일정하다.

Fig. 6은 각 스윙속도에 있어서 적분시간스케일과 적분공간스케일을 측정위치에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 적분시간스케일은 순간유동속도와 평균유동속도의 차인 변동속도 및 난류강도를 이용한 자기상관계수(Auto correlation coefficient)를 이용하여 구한다. 그리고 적분공간스케일은 Taylor가 제시한 적분공간스케일로서, 적분시간스케일과 평균유동속도의 곱으로 표현한 가설로부터 구한다.

적분시간스케일은 연소기 중심으로부터 외측으로

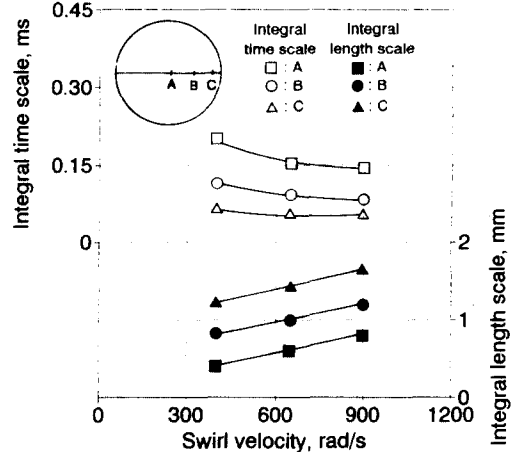


Fig. 6 Integral time scale and integral length scale as a function of swirl velocity at each measurement position.

갈수록 작아지며, 또한 스윙속도의 증가에 따라 전반적으로 작아지는 경향이다. 적분시간스케일은 난류 eddy가 시간의 경과에 따라 eddy의 고유성을 잃거나 소멸되는데 소요되는 시간으로써, 스윙속도의 증가에 따른 유동속도의 증가로 감소되는 것을 알 수 있다.

적분공간스케일은 연소기 중심으로부터 외측으로 갈수록 증가하는 경향이고, 스윙속도가 증가함에 따라 공간적으로 큰 값을 나타낸다. 그리고 적분시간스케일의 경우와는 달리 연소기 외측으로 갈수록 스윙속도의 증가에 따른 차이가 커진다. 적분공간

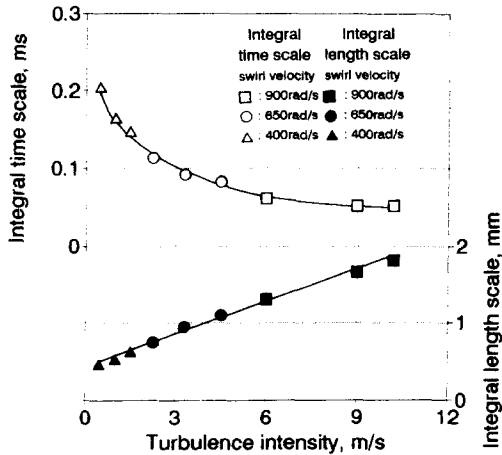


Fig. 7 Integral time scale and integral length scale as a function of turbulence intensity at each swirl velocity.

스케일은 난류 eddy의 고유성을 잃는데 소요되는 거리로서, 스윙속도의 증가에 따른 유동속도가 증가하면 증가한다.

Fig. 7은 난류강도의 변화에 따른 적분시간스케일(t_i)과 적분공간스케일(l_i)을 각각의 스윙속도에 대해 나타낸 것이다.

적분시간스케일은 스윙속도에 관계 없이 난류강도가 증가함에 따라 감소하는 경향으로써 반비례

관계를 갖는다. 이와 같은 경향은 전술한 바와 같이 난류강도는 유동속도에 비례하고, 적분시간스케일은 유동속도에 반비례하는데 기인하는 것이다. 그리고 적분공간스케일은 전반적으로 스윙속도에 관계없이 난류강도에 선형적으로 비례하는 경향이 며, 이와같은 경향은 적분시간스케일의 경우와 유사한 원인에 기인하는 것으로 판단된다.

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

4. 난류화염속도에 미치는 난류특성의 영향

Fig. 8은 중심점화, 0.5R 점화, 벽면점화 경우에 있어서 스윙속도의 변화에 따른 화염전파를 가시화한 것이다. 시간이 경과함에 따라 화염이 전파하는 형상은 점화위치와 스윙속도의 변화에 따라 다른 양상을 나타내고 있다.

중심점화인 경우 화염은 연소실 중앙으로부터 원형으로 전파하는 형상이다.⁽¹⁰⁾ 그리고 스윙속도가 증가함에 따라 화염이 최대화염도달거리에 도달하는 시기가 빨라지며, 난류유동의 영향으로 인해 화

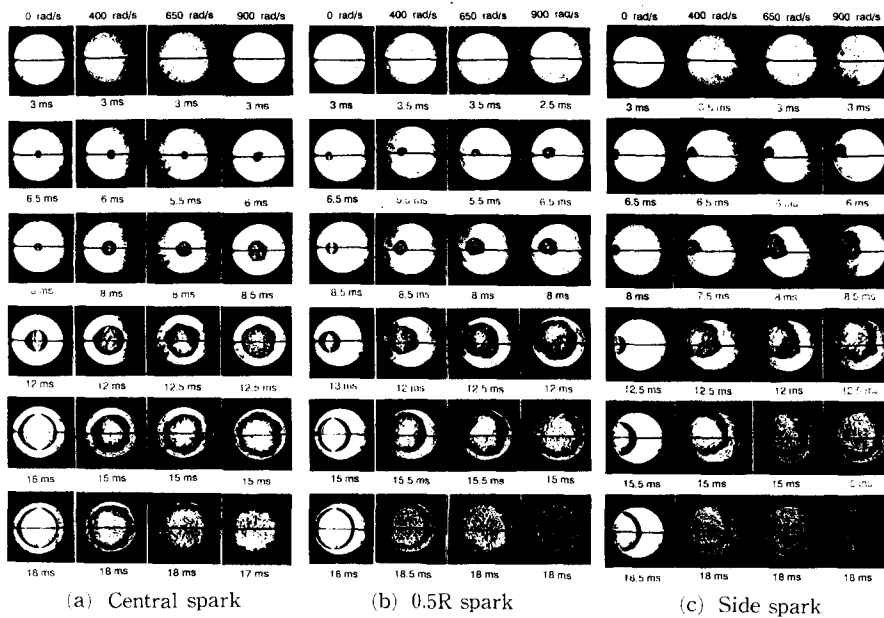


Fig. 8 Schlieren photographs of the flame propagation in constant volume combustion chamber

염면이 변형되고 화염대가 두꺼워지는 것을 알 수 있다.

0.5R 점화인 경우는 화염이 스윙유동의 영향으로 인하여 점화후 시간이 경과함에 따라 점화위치로부터 구형으로 전파하지 않고, 스윙유동에 동반되는 것을 알 수 있다. 그리고 그 동반되는 정도는 스윙속도가 증가함에 따라 커지는 것을 알 수 있다.

그리고 벽면점화인 경우는 스윙유동 외측의 강한 주류에 의해 연소과정의 초기시기부터 화염이 점화 위치로부터 이탈되어 전파하는 것을 알 수 있다. 그리고 스윙속도가 증가함에 따라 화염의 선단이 최대화염도달거리에 도달하는 시기가 빨라지는 것을 알 수 있다.

화염사진에 나타난 바와 같이 화염전파가 종료되는 시기는 동일 스윙속도에 있어서 중심점화의 경우가 가장 빠른 것을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 화염면적의 차이에 기인하며, 벽면점화의 경우가 중심점화의 경우에 비하여 화염속도는 빠르지만, 점화위치의 변화에 따른 최대화염도달거리가 중심점화인 경우 40mm, 0.5R 점화인 경우 60mm, 그리고 벽면점화의 경우 78mm로써, 중심점화 경우의 최대화염도달거리가 가장 짧는데 기인하는 것으로 판단된다.

난류화염속도를 구하는 것은 화염사진에 나타난 바와 같이 화염이 난류유동의 영향으로 인해 주류형상으로 되어 전파하기 때문에 구하기가 쉽지 않다. 이를 위하여 이온프로브를 이용하는 경우에는 화염전파의 공간적인 거동을 파악하기가 용이하지 않으므로, 화염속도를 파악하기가 힘들다. 따라서 화염속도는 화염전파를 슬리렌 촬영하여 얻은 화염사진을 기초로 하여 기연혼합기의 체적과 동일한 등가체적을 작도하여 구한 등가화염 반지름을 이용하여 구한다.

Fig. 9는 난류강도의 변화에 따른 화염속도(S_F)와 등가화염 반지름(r_{Fe})과의 관계를 나타낸 것이다. 이 경우 점화위치는 중심점화이다. 난류화염속도 S_F 는 시간에 대한 등가화염 반지름 r_{Fe} 의 변화율이며, 임의 시각 t 에 있어서 화염속도를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$S_F(t) = \frac{\Delta r_{Fe}(t)}{\Delta t} \quad (1)$$

화염속도는 등가화염 반지름이 증가함에 따라 즉

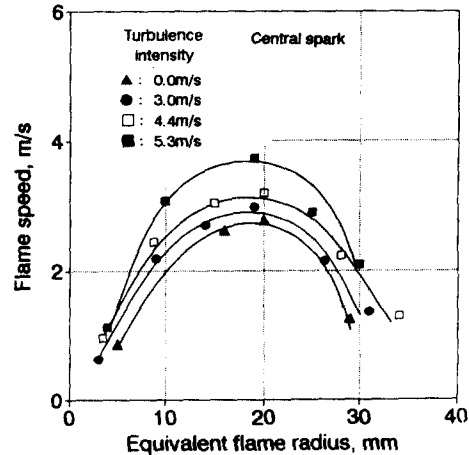


Fig. 9 Flame speed as a function of equivalent flame radius at each turbulence intensity in case of central spark.

화염이 전파함에 따라 증가 후 감소의 경향을 나타낸다. 이와 같은 경향은 난류화염속도를 구성하는 연소속도와 이송효과에 의한 것으로 판단된다. 화염이 전파함에 따라 난류연소속도는 증가하는 경향이거나, 이송에 의한 효과는 연소에 따른 발생열량의 증가로 인하여 증가후, 화염이 전파함에 따라 미연혼합기의 압축되는 정도가 증가함에 따라, 화염속도가 증가후 감소의 경향을 갖는 것으로 판단된다.

그리고 난류강도가 증가함에 따라 화염속도는 전반적으로 큰 값을 갖는다. 이와 같은 경향은 난류강도가 증가함에 따른 난류특성의 영향으로 인해 동일한 등가화염 반지름에 있어서 난류연소속도와 화염을 이송시키는 효과가 증가하는데 기인하는 것으로 판단된다.

또한 난류강도가 증가할수록 화염속도의 최고값은 커진다. 여기서 최대화염속도가 나타나는 등가화염 반지름은 중심점화의 경우에는 연소실 반지름의 50% 정도에 해당하지만, 최대화염속도가 나타나는 시기를 연소시간에 대한 비로 나타내면 연소시간의 약 60%에 해당된다. 따라서 화염속도가 최고가 되는 시기는 연소시간 중반의 약간 이후에 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 스윙속도의 변화에 따른 평균화염속도(S_{Fm})와 평균연소속도(S_{Bm})를 나타낸 것이다. 여기서 평균화염속도 S_{Fm} 은 연소기간중 각 등가화염반지름 r_{Fe} 에 대한 화염속도 S_F 를 평균하여 구한다. 평균연소속도는 질량연소율, 화염면적, 미연혼합기

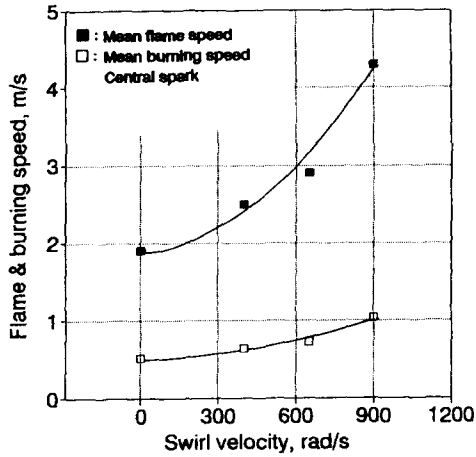


Fig. 10 Mean flame speed and mean burning speed as a function of swirl velocity in case of central spark.

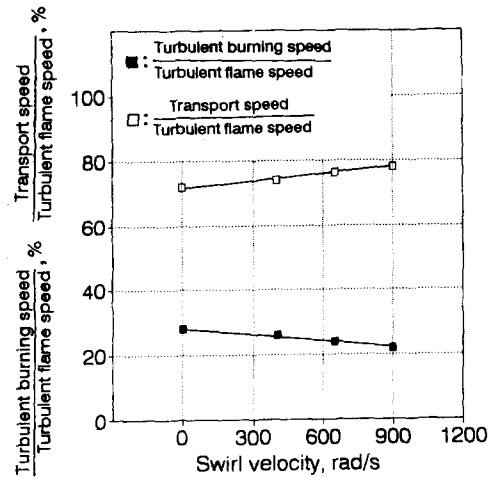


Fig. 11 The ratio of turbulent burning speed and transport speed to turbulent flame speed as a function of swirl velocity.

의 밀도를 고려한 미연혼합기의 질량보존식을 이용하여 구한 연소속도를 평균하여 구한다.

스윙속도가 증가함에 따라 연소속도와 화염속도는 모두 증가하는 경향이며, 그 증가하는 정도는 스윙속도가 증가할수록 모두 커지는 것을 알 수 있다.

그리고 임의 스윙속도에 있어서 화염속도와 연소속도와와의 차이는 화염을 이송시키는 이송효과에 의한 것으로써, 기연혼합기의 발생열량과 연소실내의 난류특성의 작용에 의한 것이다. 스윙속도가 증가함에 따라 이송효과는 증가하는 것을 알 수 있으며, 이로부터, 스윙속도가 증가함에 따라 난류화염속도가 증가하는 것은, 난류연소속도의 증가와 함께 이송에 의한 효과가 증가하는데 기인하는 것으로 예상된다.

Fig. 11은 스윙속도의 변화에 따라 난류화염속도 (S_{FT})에 미치는 난류연소속도 (S_{BT})와 이송속도의 영향을 나타낸 것으로써, 화염속도중에 연소속도와 이송속도가 각각 차지하는 정도를 구분하여 나타낸다.⁽¹¹⁾ 여기서 이송효과는 화염속도와 연소속도의 차로부터 구한다.

연소속도가 화염속도에 차지하는 비율은 0 rad/s 인 경우, 즉 층류연소장인 경우에는 25% 정도를 나타내며, 이송효과는 화염속도의 75%임을 알 수 있다.

연소속도가 화염속도에 차지하는 비율은 스윙속도가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향이며, 이송

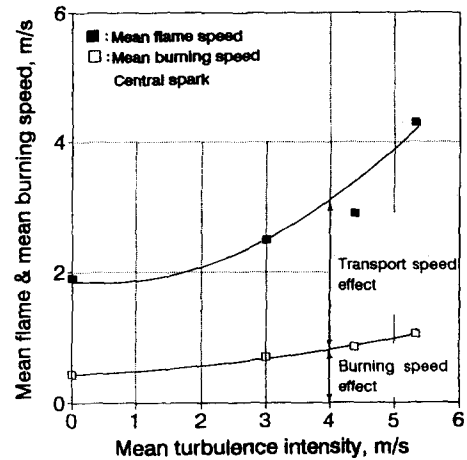


Fig. 12 Mean burning speed and mean flame speed as a function of mean turbulence intensity in case of central spark.

속도가 화염속도에 차지하는 비율은 스윙속도가 증가함에 따라 증가하는 경향이다. 이와 같은 경향으로부터 스윙속도의 증가에 따른 화염속도의 증가는 연소속도의 영향 보다는 화염의 이송에 의한 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

Fig. 12는 난류강도의 변화에 대한 화염속도와 연소속도를 나타낸 것이다. 난류강도가 증가함에 따라 연소속도와 화염속도는 모두 증가하는 경향이며, 그 증가하는 정도는 난류강도가 증가함에 따라

커지는 것을 알 수 있다.

여기서 난류강도가 증가함에 따라 난류연소속도가 증가하는 것은 전술한 바와 같이 난류강도의 연소촉진효과에 의한 것이다. 그리고 화염속도가 증가하는 이유는 난류강도의 증가로 기연혼합기의 열발생량이 증가되어 기연혼합기의 팽창이 커지는 것에 기인하는 것으로 생각된다. 이와 같은 결과로부터 난류강도가 증가하면 연소속도와 화염속도가 모두 증가하는 것을 알 수 있다.

또한 화염속도와 연소속도의 차인 화염의 이송효과는 난류강도가 커질수록 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 적분공간스케일의 변화에 대한 화염속도와 연소속도를 나타낸 것이다. 적분공간스케일이 증가함에 따라 연소속도와 화염속도는 증가하는 경향이다. 그리고 그 증가하는 경향은 지수함수적으로서, 적분공간스케일이 증가함에 따라 연소속도와 화염속도의 증가하는 정도가 더욱 커지는 것을 알 수 있다.

여기서 난류연소속도가 증가하는 것은 전술한 바와 같이 적분공간스케일이 화염대에 있어서 열전달 면적을 증가시키는데 기인한다. 그리고 화염속도가 증가하는 것은 팽창에 의한 영향과 화염사진에 나타난 바와 같이 적분공간스케일이 화염대의 두께를 증가시키는데 그 원인이 있다. 이와 같은 영향으로 인하여 화염의 이송효과는 적분공간스케일이 커질수록 증가하는 것을 알 수 있다.

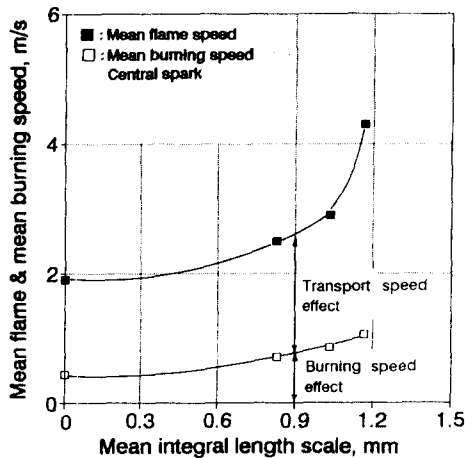


Fig. 13 Mean burning speed and mean flame speed as a function of mean integral length scale in case of central spark.

5. 화염형태와 난류특성과의 관계

난류유통장에 있어서의 화염면적은 난류유통의 영향을 받아 증대되고, 이로 말미암아 미연혼합기 쪽으로의 열전달 면적이 증가하여 연소가 활발하므로, 화염사진으로 관찰한 화염형태와 난류강도 및 난류스케일과의 관계를 밝힌다.

Fig. 14는 평균 난류강도의 변화에 따른 평균 화염면적을 점화위치의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 화염면적은 화염사진을 기초로 하여 구한다.

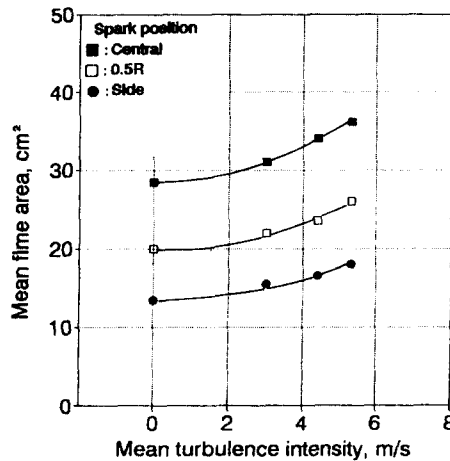


Fig. 14 Mean flame area as a function of mean turbulence intensity at each spark position.

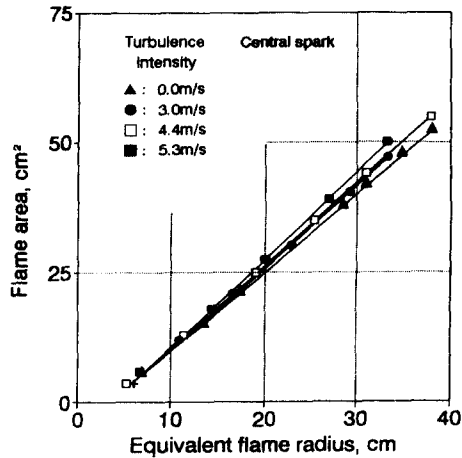


Fig. 15 Flame area as a function of equivalent flame radius at each turbulence intensity in case of central spark.

화염면적은 난류강도가 증가함에 따라 증가하는 경향이며, 점화위치가 연소실 벽면 쪽으로부터 연소실 중앙 쪽으로 이동함에 따라 화염면적이 전반적으로 큰 경향을 나타내고 있다. 이는 연소실 중앙에서 점화시킨 경우 화염의 전파가 방사형으로 전파하는 데 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 15는 난류유동에 의한 화염면적의 증가를 파악하기 위하여 등가화염 반지름에 대한 화염면적을 나타낸 것이다. 여기서 등가화염 반지름은 화염 사진으로부터 화염면을 등가원으로 작도하여, 등가원의 반지름을 구한 것이다.

등가화염 반지름이 증가함에 따라 화염면적은 증가하는 경향이고, 난류강도가 증가함에 따라 전반적으로 약간 큰 값을 나타낸다. 이와 같이 동일 등가화염 반지름에 있어서 화염면적이 난류강도 증가에 따라 차이를 나타내는 것은 난류강도의 영향으로 인해 화염면이 주름형상으로 되고, 화염대에 미연혼합기와 기연혼합기가 혼재되어 있는데 기인하는 것으로 판단된다.

이와 같이 화염형태를 변화시키는 난류특성의 영향을 평가하기 위하여 Fig. 16에 질량연소율과 체적연소율을 난류강도의 변화에 따라 나타낸다. 여기서 질량연소율은 화염사진과 연소실내의 압력을 이용하여 구하였다. 그리고 체적연소율은 화염사진으로부터 구한 기연혼합기의 체적을 이용하여 구하였다.

총류유동장인 경우 즉 난류강도가 0 m/s인 경우

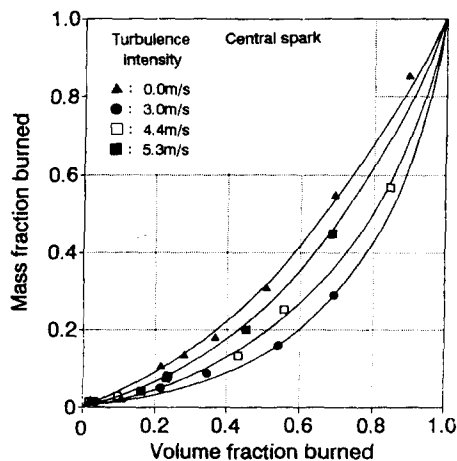


Fig. 16 Mass fraction burned as a function of volume fraction burned at each turbulence intensity in case of central spark.

체적연소율이 증가함에 따라 질량연소율은 점차로 증가하다가 중반 이후부터는 급격히 증가하며, 혼합기가 총체적의 50% 연소되었을 때 질량은 30% 정도 연소가 된다.

이와 같은 경향은 화염이 전파함에 따른 기연혼합기의 팽창으로 인하여 미연혼합기가 압축됨에 따라 체적적으로는 많이 연소되었으나, 질량적으로는 소량이 연소된 것에 기인한다.

난류강도가 증가함에 따라 임의 체적연소율에 있어서 질량연소율은 난류강도가 0 m/s, 5.3 m/s, 4.4 m/s, 그리고 3.0 m/s인 경우의 순으로 감소 경향을 나타내고 있다. 이와 같이 난류유동장의 경우가 총류유동장의 경우보다 임의 체적연소율에 있어서 질량연소율이 작은 것은 화염사진에 나타난 바와 같이 총류연소장의 경우에 비하여 난류연소장에서의 화염이 주름형상으로 되며, 화염대와 기연혼합기부에 미연혼합기와 기연혼합기가 혼합되어 있는데 기인하는 것으로 판단된다.

그리고 난류강도가 증가함에 따라 임의 체적연소율에 있어서 질량연소율은 큰 값을 나타내며, 이것은 난류강도의 증가에 따른 연소촉진에 기인하는 것으로 판단된다.

6. 화염속도비와 난류특성과의 관계

화염속도는 난류특성의 영향을 받아 증가하며, 이를 평가하기 위하여 스윙속도가 0 rad/s인 총류유동장에서의 총류화염속도(S_{FL})에 대한 난류화염속도 S_{FT} 의 비인 화염속도비(FSR)를 구하여 해석하였다.

Fig. 17은 각 점화위치에 있어서 난류강도의 변화에 따른 화염속도비를 나타낸 것이다. 난류강도가 증가함에 따라 화염속도비는 지수함수적으로 증가하는 경향으로써, 난류강도가 클수록 증가하는 정도가 커진다. 그리고 점화위치의 변화에는 상관 없는 것으로 나타난다.

이와 같은 경향으로부터 난류연소장에 있어서 난류강도 u' 와 화염속도비 FSR과의 관계는 $FSR = e^{0.130u'}$ 와 같이 표시할 수 있다.

Fig. 18은 각 점화위치에 있어서 적분공간스케일의 변화에 따른 화염속도비를 나타낸 것이다. 적분공간스케일이 증가함에 따라 화염속도비는 지수함수적으로 증가하는 경향으로써 적분공간스케일이 클수록 커지며, 점화위치에는 상관 없다.

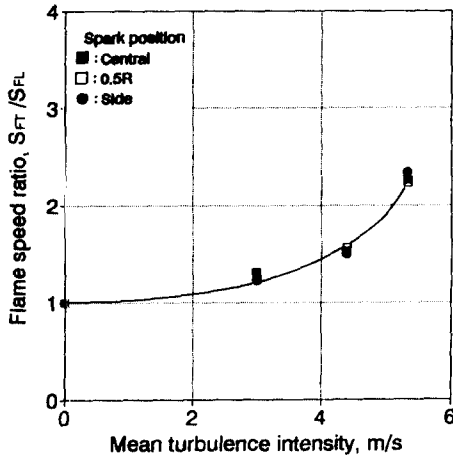


Fig. 17 Flame speed ratio as a function of mean turbulence intensity at each spark position.

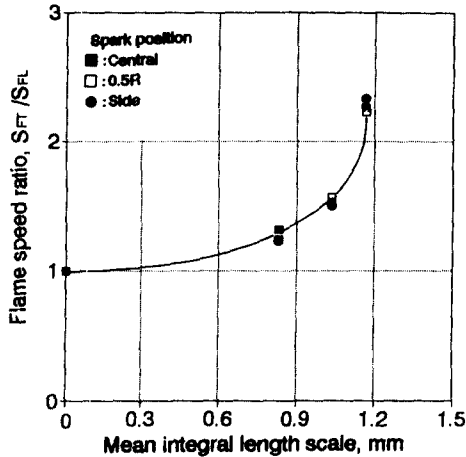


Fig. 18 Flame speed ratio as a function of mean integral length scale at each spark position.

이와 같은 경향으로부터 난류연소장에 있어서 적분공간스케일 l_x 와 화염속도비 FSR와의 관계는 $FSR = e^{0.6lx}$ 와 같이 표시할 수 있다.

7. 결 론

정적연소기내의 스웰유동특성과 난류유동장의 화염전파특성의 해석 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 난류강도는 스웰속도에 관계 없이 평균유동속도에 직선적 비례관계이다. 상대난류강도는 0.3 정도이며, 적분시간스케일 및 적분공간스케일은 측

정위치에 상관 없이 스웰속도와 반비례 및 선형적 비례관계를 갖는다. 난류강도와 적분공간스케일은 스웰속도에 상관 없이 선형적 비례관계이다.

(2) 화염속도는 화염반지름이 증가함에 따라 증가후 감소의 경향을 나타내며, 난류강도가 증가함에 따라 화염속도의 최고치는 증가한다. 또한 중심점화의 경우에 최대 화염속도가 발생하는 등가화염반지름은 난류강도에 상관 없이 연소실 반지름의 50% 정도이다.

(3) 화염속도는 연소속도와 화염 이송속도의 영향을 받으며, 스웰속도가 증가함에 따라 연소속도와 이송속도의 영향은 증가하지만, 화염속도에 대한 연소속도가 차지하는 영향은 감소하고, 이송속도에 의한 영향은 증가한다.

(4) 화염면적은 난류강도가 증가함에 따라 증가한다. 그리고 난류강도와 난류스케일이 증가함에 따라 질량연소율은 난류강도에 비례하여 증가한다.

(5) 난류강도와 난류스케일이 증가함에 따라 화염속도는 지수함수적인 증가 경향을 가지며, 총류화염속도에 대한 난류화염속도의 비, 즉 화염속도비 (Flame speed ratio, FSR)를 난류강도 u' 및 적분공간스케일 l_x 에 대하여 나타내면 $FSR = e^{0.13u'}$ 및 $FSR = e^{0.6lx}$ 로 표시된다.

참고문헌

- (1) Winsor, R. E. and Patterson, D. J., 1973, "Mixture Turbulence, a Key to Cycle Variation," *SAE Paper*, No. 730086, pp. 368~383.
- (2) Bopp, S., Vafidis, C. and Whitelaw, J. H., 1986, "The Effect of the Engine Speed on the TDC Flow Field in a Motored Reciprocating Engine," *SAE Paper*, No. 860023, pp. 187~196.
- (3) Groff, E. G. and Matekunas, F. A., 1980, "The Nature of Turbulent Flame Propagation in a Homogeneous Spark-Ignited Engine," *SAE Paper*, No. 800133, pp. 740~764.
- (4) Yahagi, Y., Ueda, T., and Mizomoto, M., 1991, "Extinction of Lean Propane/Air Turbulent Premixed Flames in a Stagnation Point Flow," *JSME*, Vol. 57, pp. 2798~2803.
- (5) Takagi, T., Hirai, S. and Oki, Y., 1991, "Prediction of Turbulent Mixing Combustion in the Swirling Flame," *JSME*, Vol. 57, pp. 715~720.

- (6) Hamamoto, Y., Tomita, E. and Zhang, Z., 1993, "Tumbling Flow in a Pentroof-type Combustion Chamber of an Internal Combustion Engine," *JSME*, Vol. 59, pp. 974~980.
- (7) Wong, V. W. and Hoult, D. P., 1979, "Rapid Distortion Theory Applied to Turbulent Combustion," *SAE Paper*, No. 790357, pp. 1243~1262.
- (8) 이상준, 이종태, 이성열, 1992, "난류연소속도에 미치는 스윙유동특성의 영향," 대한기계학회 추계학술대회논문집(II), pp. 306~310.
- (9) 이상준, 한동호, 김문현, 이종태, 이성열, 1992, "충류화염전파중의 연소실 벽면으로의 열손실," 대한기계학회논문집, 제16권 제7호, pp. 1398~1407.
- (10) Witze, P. O. and Lopes, M., 1986, "Direct Measurement of the Turbulent Burning Velocity in a Homogeneous Charge Engine," *SAE Paper*, No. 861531, pp. 540~551.
- (11) Witze, P. O. and Vilchis, F. R., 1981, "Stroboscopic Laser Shadowgraph Study of the Effect of Swirl on Homogeneous Combustion in a Spark-Ignition Engine," *SAE Paper*, No. 810226, pp. 979~991.