

정적 연소기내의 스월 속도 변화에 따른 플라즈마 제트 점화의 연소특성

Combustion Characteristics of Plasma Jet Ignition for Different Swirl Velocity in a Constant Volume Vessel

김 문 현*, 박 정 서**, 이 주 한**
Munheon Kim, Jungseo Park, Juhan Lee

ABSTRACT

This paper presents the evaluation of combustion characteristics of single-hole plasma jet ignitions in comparison with conventional spark ignition for variable of swirl velocity. Plasma jet plugs are three types according to ejecting directions : center of chamber, positive and negative swirl flow direction. Experiments are carried out for equivalent ratio 1.0 of LPG-air mixture in a constant volume cylindrical vessel. Not only the flame propagation is photographed at intervals, but the pressure variation in the combustion chamber is also recorded throughout the entire combustion process. The results show that the plasma jet ignitions and spark ignition enhance the overall combustion rate by increasing the swirl velocity. The dependence of the combustion enhancement rate on the swirl velocity leads to the conclusion that the plasma jet plug, which ejects plasma jet to the center of combustion chamber is the most desirable ignitor than other plugs.

주요기술용어 : Plasma jet ejection(플라즈마 제트 분출), Plasma jet ignition(플라즈마 제트 점화), Conventional spark ignition(상용 스파크 점화), Combustion enhancement rate(연소촉진율), Swirl velocity(스월 속도)

Nomenclature

CER: combustion enhancement rate
t : time, msec

Subscripts

mp : maximum pressure
sp : conventional spark plug
T : turbulent flow field
L : laminar flow field

* 회원, 숭실대학교 기계공학과

** 회원, 숭실대학교 대학원

1. 서 론

최근 환경에 대한 관심이 고조되고 있는 가운데 배기규제는 나날이 엄격해지고 있다. 이에 대응하기 위해 기관 개발자들은 초저공해 기관개발에 많은 연구들을 수행하고 있으며 그중 회박연소를 통한 배기 배출물 저감에 관한 연구가 많이 행해지고 있다. 그러나 상용의 스파크 점화방식을 적용한 회박연소는 착화성 및 연소속도의 저하로 인해 안정된 연소를 실현하는 것은 쉽지 않은 과제이며 불완전 연소로 인해 오히려 공해 배

출몰을 증가시킬 수도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 회박연소에서 착화성 및 연소속도 증가를 위한 수많은 연구들이 진행되어왔다.^{1~4)} 그 중에서 플라즈마 제트에 의한 점화방식은 고난류 점화원을 제공함으로써 회박연소에 적합한 점화원으로서 인정되고 있다.^{5~9)} 저자들도 플라즈마 제트 점화로서 초회박 연소를 실현하기 위해 플라즈마 제트 발생장치 및 여러 가지 형상의 제트 플러그를 제작하여 최적 플라즈마 제트 설계를 위한 연구들을 수행하여 왔다.^{10~14)} 본 연구는 플라즈마 제트 점화의 실기관 적용을 위한 전단계로서 스윙유동이 있는 정적 연소기에서의 플라즈마 제트 점화의 연소특성을 파악하고자 하는 것이다. 비연소장에서 연소실내로 공기를 접선방향으로 분사시켜 스윙을 발생시키고 유속을 측정 한 후, 그와 동일한 조건에서 연소실험을 행하여 취득된 압력값과 쉐리렌 가시화 사진으로 연소특성을 해석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

2.1.1 전체구성

Fig. 1은 실험장치의 전체적인 구성도를 나타낸다. 실험장치는 정적연소기를 중심으로 하여 압력측정부, 플라즈마 제트 점화시스템, 예혼합기 공급부, 스윙 발생부, 쉐리렌 가시화장치, 자동 온도조절부, 시간 제어시스템으로 구성된다.

실험에 사용된 플라즈마 제트 점화장치는 트리거 신호로서 파워 트랜지스터를 구동하여 상용의 점화코일에서 고전압을 유도시켜 플라즈마 제트 플러그 간극에서 절연파괴를 일으키도록 하였다. 부가에너지 (E_s : sub-energy)는 0~2 kV의 일정 전압으로 콘덴서에 저장되며 플라즈마 제트 플러그 간극에서 절연파괴가 일어남과 동시에 방출된다. 본 실험에서 플라즈마 제트 점화장치의 부가에너지는 콘덴서에서의 충전 전압을 변화시켜 조절하였으며 콘덴서의 용량은 20 μ F로 하였다.

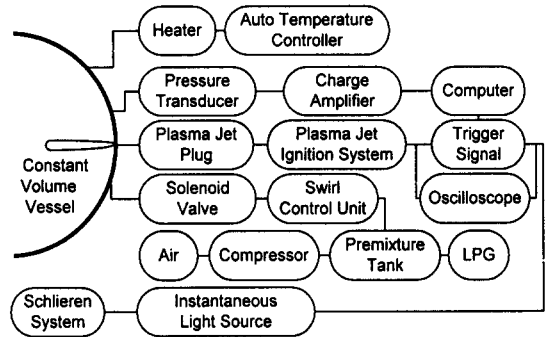


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.1.2 플라즈마 제트 플러그

Fig. 2는 플라즈마 제트 플러그의 형상을 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 절연 파괴된 양극과 음극사이에 부가에너지가 공급되면 플러그의 간극 사이가 고온으로 되고 자유전자와 양이온으로 구성된 플라즈마가 순간적인 부피팽창으로 인하여 제트의 형태로 분출된다. 양극과 음극, 그리고 제트 플러그 모재의 재질은 황동으로 하였고 절연체의 재질은 테프론을 사용하였다.

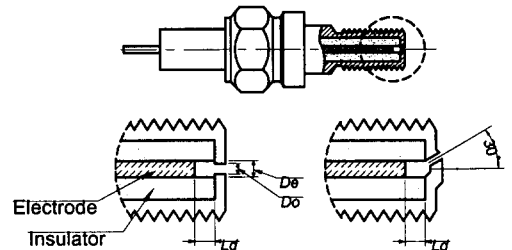


Fig. 2 Schematic diagram of plasma jet plug

본 연구에서는 제트의 분출방향에 따라 연소실 중심방향으로 분출되는 단공 제트 플러그를 PJ1A, 스윙방향을 PJ1B, 스윙 반대방향을 PJ1C로 명명하였으며 PJ1B, PJ1C의 경우 제트의 분출은 연소실중심에서 30° 방향으로 하였다. 각각의 플라즈마 제트 플러그의 간극깊이(L_d : cavity depth) 및 전극 직경(D_e)은 2 mm로 하였고 오리피스 직경(D_o)은 1 mm로 하였다. 연소실내의 초기압력 0.1 MPa, 초기온도 313 K,

부가에너지(E_s)는 2 J이다.

2.1.3 정적연소기

실험에 사용된 연소실은 Fig. 3과 같이 직경 80 mm이며 폭은 25 mm의 원통형으로서 예혼합기의 스월발생을 위해 흡입밸브를 연소실의 접선방향으로 설치하였다. 연소실의 전·후면은 가시화가 용이하도록 두께 22 mm의 무굴절 광학유리를 설치하였으며 정적연소실내의 압력은 압력변환기 및 증폭기를 거쳐 A/D변환기를 통하여 컴퓨터에 입력시킨 후 해석하였다. 연소 초기온도를 일정하게 유지하기 위해 K-type열전대 및 히터를 설치하여 제어하였으며 일정한 혼합기의 공급 및 배기가스 배출을 위해 컴퓨터로 제어되는 솔레노이드 밸브 및 진공펌프를 사용하였다. 화염전파의 가시화는 쉐리렌 장치를 사용하였으며 직경 300 mm의 오목거울, 평면거울과 순간광원, 나이프에지, 상용의 스틸 카메라(Canon AL-1)로 구성된다. 트리거 스위치에서 발생된 신호는 시간지연장치를 통하여 순간 광원을 발생시켜 각 순간에서의 연소진행상황을 촬영하며, 동시에 정적연소기내에서 발생하는 압력값은 압력변환기(Kistler Co. 601A)로 측정된 후 증폭기로 증폭시켜 A/D 변환기를 통해 샘플링 하였다.

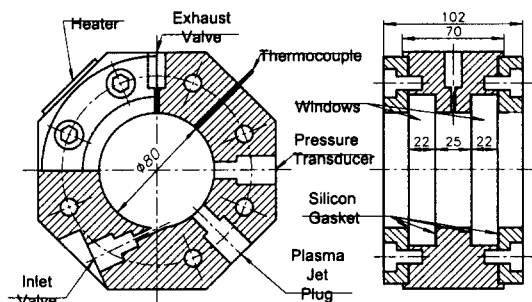


Fig. 3 Drawing of constant volume vessel

2.1.4 스월발생장치

정적연소기내에 스월을 발생시키기 위하여 스월발생장치를 제작하였다. 스월발생장치는

470 cc의 에어실린더, 흡·배기 밸브와 5개의 솔레노이드 밸브 및 압력계로 구성하였다. 스월의 발생은 예혼합기 공급장치로부터 혼합기를 에어실린더로 유입시켜 압축공기로 가압하였으며 이때의 압축압력은 콤프레셔로 가압된 고압의 공기를 압력조절기를 통해 0.4 MPa로 일정하게 유지시키고 압력계로 확인할 수 있도록 하였다. 이렇게 압축된 혼합기는 컴퓨터로 제어되는 연소기 흡입구에 설치된 솔레노이드 밸브를 통해 진공상태의 연소실로 공급되어 0.1 MPa의 연소실 초기압력을 이룰 수 있도록 하였다.

2.2 실험방법

모든 실험은 연소초기압력 0.1 MPa, 초기온도 313K, 당량비 $\phi=1.0$, 그리고 점화에너지 2 J로 일정하게 유지시켜 행하였다. 실험 변수로 제트의 분출방향에 따른 플라즈마 제트 플러그의 형상변화 및 스월속도를 변화시키면서 연소가시화와 연소실 내의 압력변화를 측정하고 연소촉진율(Combustion enhancement ratio : CER) 지수를 도입하여 각 조건에 따른 연소특성을 해석하였다. 각각의 실험 변수 설정방법은 다음과 같다.

2.2.1 플라즈마제트플러그 형상변화

플라즈마 제트 플러그의 형상변화는 상용 스파크 점화플러그와 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 단공형 플라즈마 제트 플러그를 이용하여 연소실 중심방향으로는 PJ1A, 스월방향으로는 PJ1B, 스월 반대방향으로는 PJ1C로서 플라즈마 제트의 분출방향에 따른 연소특성을 파악하였다.

2.2.2 스월속도변화

정적연소기내의 스월속도의 측정은 정온도형 열선유속계(KANOMAX co, Model 1011)를 사용하였으며 Probe calibrator(KANOMAX co, Model 1065)를 사용하여 열선유속계의 보정을 행하였다. 이 보정된 열선유속계를 이용하여 스월발생장치에서 정적연소실의 접선방향으로 공급

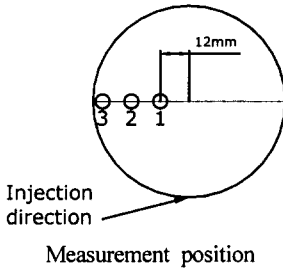
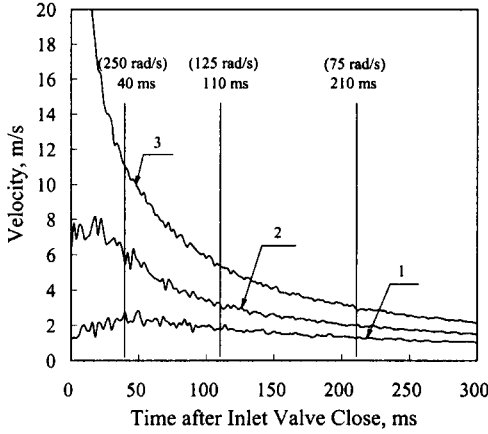
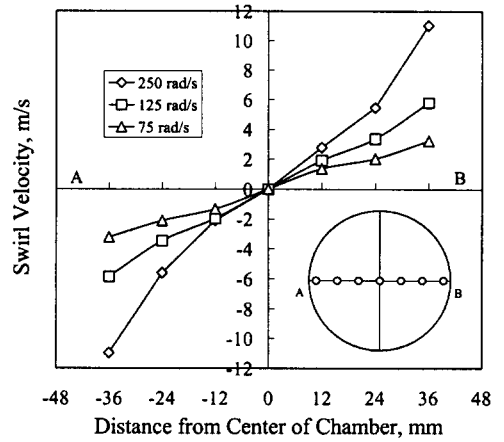
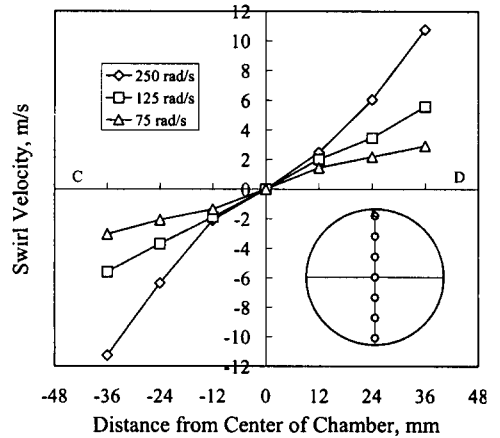


Fig. 4 Instantaneous flow velocity as a function of time after inlet valve close and measurement positions

되는 압축공기에 의해 발생되는 스웰유동을 연소실 중심으로부터 12 mm 간격의 세지점에서 측정하였으며 흡입밸브가 닫힌 후 시간경과에 따른 세 지점의 순간유속을 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 흡기밸브가 닫힌 후 시간이 경과함에 따라 순간유속이 세 지점 모두 점진적으로 감소되고 있는 것을 알 수 있으며 이러한 유속의 감쇠특성을 스웰속도 변화에 이용하였다. 흡입공기를 연소기의 점선방향으로 공급함으로써 흡기 공급 초기에 연소실 3번 위치에서의 순간유속 값이 매우 높게 나타나고 있지만 급격하게 감소하여 전체적으로 약 40 ms 경과 이후에는 연소실 내부의 스웰유동이 대체적으로 강제운동을 이루는 것으로 짐작된다. 강제운동의 여부를 확인하기 위하여 이 시점들에서 연소실 내의 공간적인 유속분포를 Fig. 5에 나타내었다.



(a) Horizontal swirl velocity distribution



(b) Vertical swirl velocity distribution

Fig. 5 Swirl velocity distribution

이 확인과정은 Fig. 5에서 연소기의 가로방향(a)와 세로방향(b)의 총 13지점에서 이루어졌으며 이를 통해 실험하고자 하는 시점에서의 스웰유동이 공간적으로도 비교적 안정된 강제운동을 하고 있다는 것을 알 수 있었다. 이러한 사실을 근거로 실험변수로서 스웰속도를 사용하기 위해 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 흡입밸브가 닫힌 후 40 ms, 110 ms, 210 ms의 세 시점에서 실험을 수행함으로써 250 rad/s, 125 rad/s, 75 rad/s와 같은 연소초기 스웰속도 조건들을 얻을 수 있었으며, 본 실험에서 125 rad/s 이상의 스웰속도

범위에서의 통상적인 연소기간은 약 10 ms이내 이므로 이 기간동안은 유속의 큰 변화가 없다는 점을 고려해 볼 때 이 시점에서 대표적인 각속도의 실험조건으로서 선택되어도 무리가 없으리라 판단하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염가시화 및 압력경과곡선

Fig. 6~9는 상용 스파크 플러그 점화 및 중심 방향분출의 단공 플라즈마 제트 그리고 단공 플러그의 분출방향을 스윙 방향과 스윙 반대방향으로 분출하는 제트 플러그(각각 SP, PJ1A, PJ1B, PJ1C라고 표기)에 의한 화염 전파과정을 나타내었으며 당량비 $\phi=1.0$ 인 경우 0, 75, 125, 250 rad/s의 스윙속도 변화에 대해 촬영된 쉘리렌 가시화 사진을 보여준다. 스윙 방향은 반시계 방향으로 하였다. 사진에서 보는 바와 같이 전반적으로 스윙속도의 증가에 따라 연소기간은 단축되는 경향을 나타내고 있다. Fig. 6에서 보면 상용 스파크 플러그의 경우 스윙속도 증가에 따라 연소 촉진효과가 증대되고, 스윙속도가 250 rad/sec인 경우는 스윙이 없는 경우에 비해 연소기간이 최대 1/4 이상으로 감소하고 있다. 플라즈마 제트 플러그의 경우도 전반적으로 스윙의 영향을 받고 있으며 스윙의 영향은 스윙 방향(PJ1B) 및 스윙 반대방향 분출(PJ1C)의 경우보다 연소실 중심방향 분출(PJ1A)이 더 효과적으로 나타났다. 이것은 PJ1B 및 PJ1C의 경우 분출된 제트가 순회류를 따라 회전하면서 화염면이 조기에 연소실 벽면에 닿아 연소실 벽면으로의 열손실과 화염전파거리가 증대되기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 7의 PJ1A의 경우 스윙속도가 강할수록 화염면이 플러그에서 이탈되는 현상이 나타나 연소 후반부에서는 스윙의 영향으로 연소가 촉진되고 있다. 또한 화염이 중심부에서 벽면으로 전파되기 때문에 화염 전파 거리도 짧고, 화염의 벽면접촉에 의한 열손실이 다른 플러그에 비해 작아 연소 촉진 효과가 크게 나타나는 것으로 판단된다.

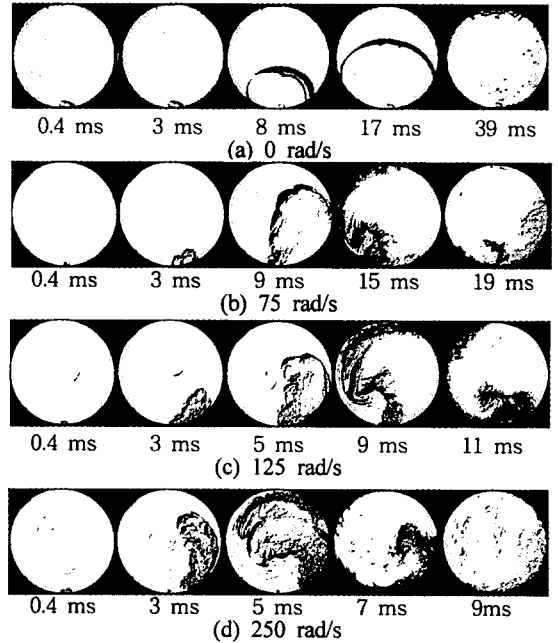


Fig. 6 Schlieren photographs of propagating flames for various swirl velocities in case of Spark plug ignition(SP) at $\phi=1.0$

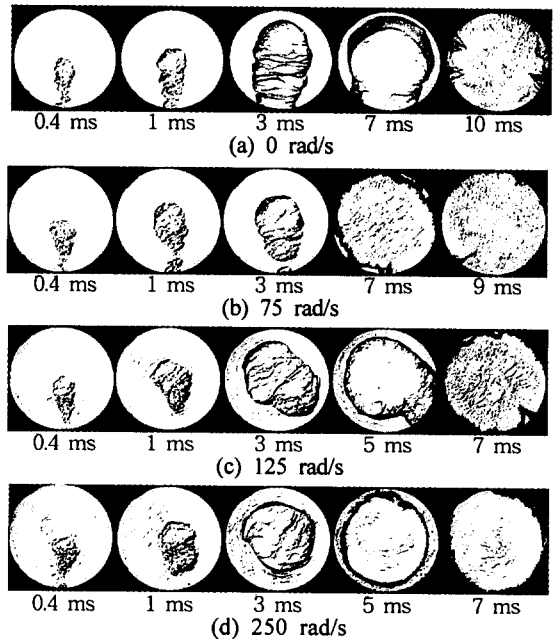


Fig. 7 Schlieren photographs of propagating flames for various swirl velocities in case of center direction plasma jet ignition(PJ1A) at $\phi=1.0$

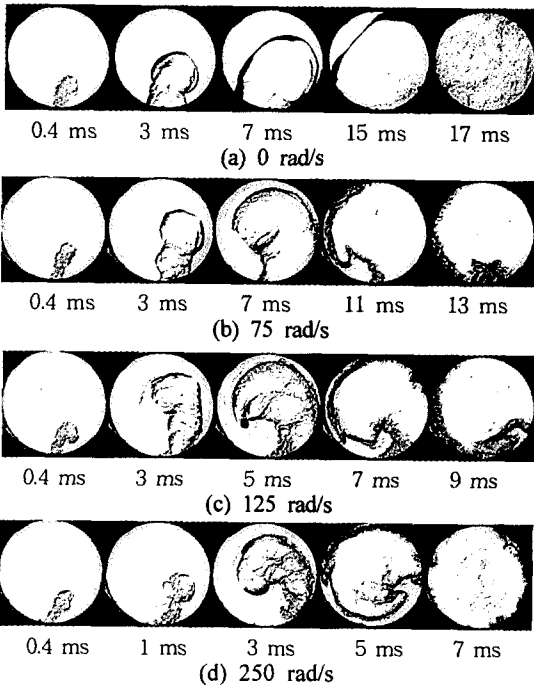


Fig. 8 Schlieren photographs of propagating flames for various swirl velocities in case of positive swirl direction plasma jet ignition(PJ1B) at $\phi = 1.0$

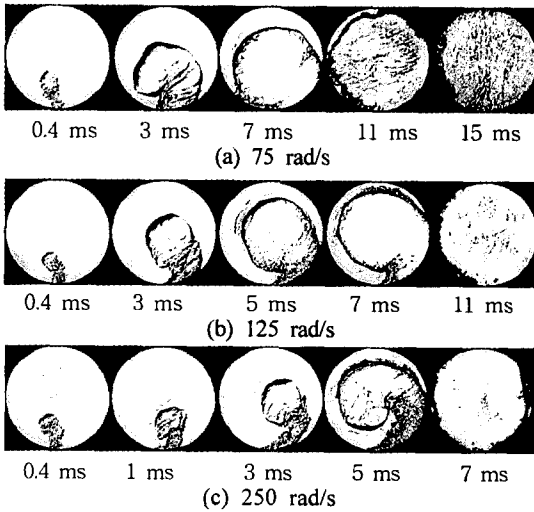
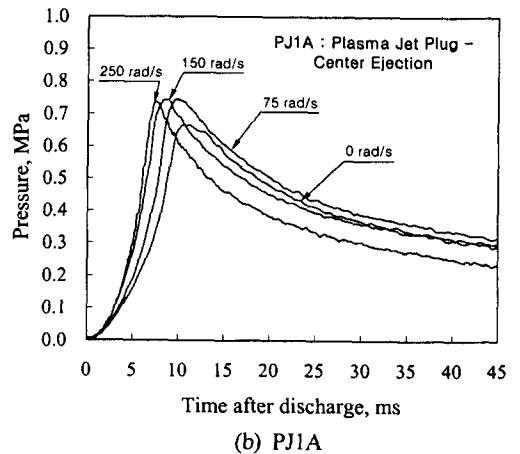
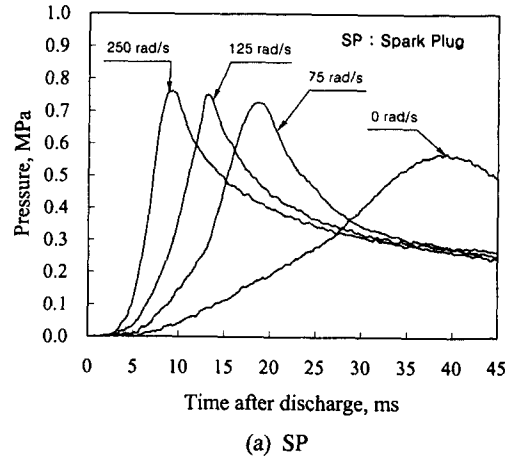
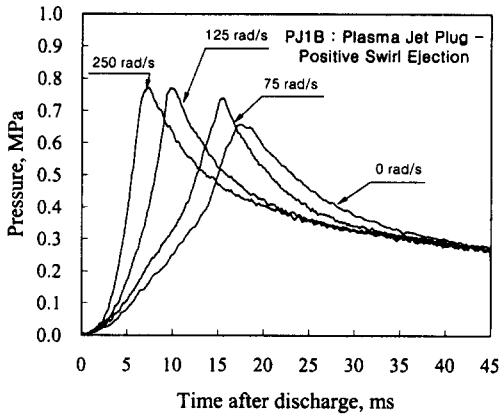


Fig. 9 Schlieren photographs of propagating flames for various swirl velocities in case of negative swirl direction plasma jet ignition (PJ1C) at $\phi = 1.0$

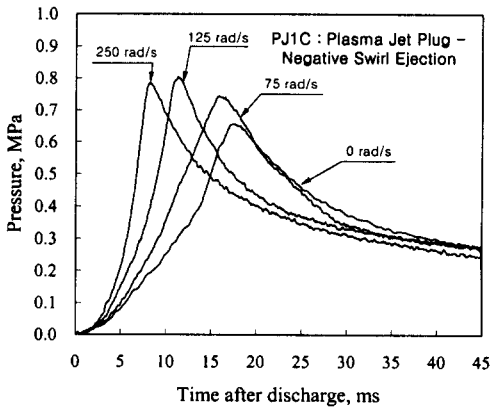
플라즈마 제트 분출방향에 따른 연소특성을 알아보기 위해 PJ1B 및 PJ1C를 사용한 화염 전파과정의 가시화 사진들을 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 스월이 없는 경우 (0 rad/sec)의 가시화 사진은 분출방향만 다를 뿐 Fig. 8(a)의 경우와 동일한 분출특성을 나타내므로 생략하였다.

Fig. 8, 9를 비교하여 보면 제트의 분출방향에 따른 차이는 그다지 크게 나타나지는 않지만 스월방향으로 제트를 분출시키는 것이 좀더 효과적인 것으로 나타나고 있다. Fig. 9에서 PJ1C의 경우 연소 초기에는 플라즈마 제트 분출방향으로 화염면이 형성되지만 이후 스월의 영향으로 화염 전면이 약간 중심쪽으로 밀리면서 스월방향으로





(c) PJ1B



(d) PJ1C

Fig. 10 Comparison of pressure variation in constant volume vessel according to variation of swirl velocity at $\phi = 1.0$

분출시킨 Fig. 8의 PJ1B경우와 비슷한 형태로 화염이 전파되는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 각각의 점화플러그에 대한 압력경과 곡선을 비교한 것이다. 전술한 바와 같이 스윙속도가 증가함에 따라 최고압력 도달시간이 단축되고 최고압력이 상승하고 있다. E. Murase¹⁵⁾의 연구에 의하면 스윙유동장에서는 상용 스파크 플러그 점화가 플라즈마 제트 점화보다 최고압력과 최고압력 도달시간이 더 높고 짧아진다고 보고하고 있다. 이러한 현상은 플라즈마 제트 점화의 경우 제트 분출에 의해 형성된 화염면이 연소기 중앙으로부터 발달하고 있는 반면, 상용 스파크 점화의 경우는 화염이 스파크 플러그 전극봉에서

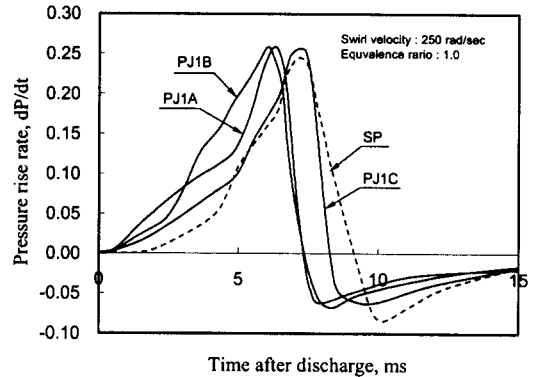


Fig. 11 Comparison of pressure rise rate according to variation of plug shape at swirl velocity 250 rad/sec, $\phi = 1.0$

이탈되지 않은 상태로 최대 스윙속도 영역인 가장자리에서 선화하며 화염이 전파되므로 많은 양의 혼합기가 연소된다고 설명하고 있다. 본 연구에서의 실험결과는 상용 스파크 점화의 경우에 비해 플라즈마 제트 점화에 의한 연소기간이 짧게 나타나고 있는데 이러한 결과의 차이는 그들의 실험조건이 연소속도가 느린 회박영역에서 이루어졌기 때문인 것으로 생각되며 또 다른 요인으로 플라즈마 제트 플러그의 캐비티 체적, 오리피스 지름 등 형상적인 차이뿐만 아니라 공급에너지의 차이 등에 기인한 것으로 생각되며 이와 관련된 심도 깊은 연구가 요구된다.

본 실험에서의 연소특성을 알아보기 위해 대표적으로 스윙속도 250 rad/sec인 경우의 압력상승률 곡선을 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 연소실 중심으로 분출되는 PJ1A의 경우는 SP에 비해 연소초기의 압력상승률이 현저하게 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 가시화 사진을 통해 알 수 있는 바와 같이 스윙유속이 빠른 연소실 가장자리로 화염이 진행함에 따라 연소 말기의 압력상승률이 급격하게 증가하는 형태를 나타내고 있기 때문에 상용 스파크 플러그 점화의 경우에 비해 연소 종료점이 빠르게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 스윙방향 분출(PJ1B) 및 스윙반대방향 분출(PJ1C)의 경우를 비교해 볼 때 PJ1B의 경우가 연소 중기부터

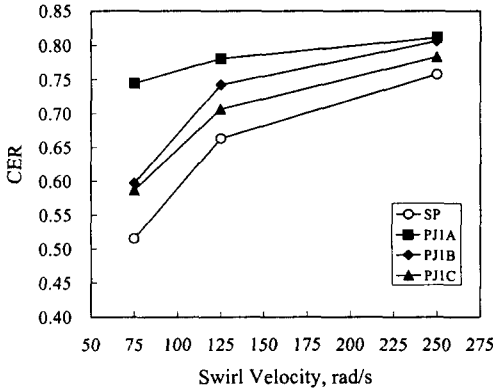


Fig. 12 Comparison of the combustion enhancement rate on the swirl velocity for each plug configuration

PJIC의 경우에 비해 압력상승률이 높게 나타나고 있다. 이것으로 보아 플라즈마 제트 점화를 실제기관에 적용할 시 연소실 내부의 스윙유동방향을 고려해야 할 것으로 사료된다.

3.2 연소촉진율

플라즈마 제트 점화의 연소촉진 효과를 종합적으로 평가하기 위한 지표의 하나로서 연소시간에 근거한 연소촉진율(CER, combustion enhancement rate)¹⁶⁾을 도입하여 스윙유동장에서의 연소촉진효과를 평가하였다. 측정의 편의상 정적연소기내 연소 종료시간이 최대압력 도달시간과 일치한다고 간주하면, 층류상태 즉 스윙이 없을 때의 상용스파크 점화(SP)를 기준으로 하여 난류유동장내의 다른 점화방법에 대한 CER은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$CER = 1 - t_{mp,r} / t_{mp,sp,L} \quad (1)$$

여기서 $t_{mp,r}$ 는 난류 유동장에서의 점화 후 최고압력 도달시간을 나타내고, $t_{mp,sp,L}$ 는 유동이 없는 상태에서 상용 스파크 플러그 점화에 의한 최대압력 도달시간을 나타낸다.

Fig. 12는 스윙속도 변화에 따른 연소촉진율을 보여준다. 스윙속도가 75, 125, 250 rad/s로 증가

함에 따라 연소촉진율은 증가하고 있으며, 상용 스파크 플러그 점화 및 플라즈마 제트 점화에 의한 연소촉진율의 차이가 좁혀지고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 스윙속도가 증가함에 따라 상용 스파크 플러그 점화의 경우에서도 고난류 화염면이 형성되기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

이상과 같이 정적 연소기내의 스윙속도를 변화시켜 플라즈마 제트점화에 의한 연소특성을 쉐리렌 가시화 및 압력경과곡선 그리고 연소촉진율로서 해석한 결과는 다음과 같이 정리될 수 있겠다.

1) 상용 스파크 점화의 경우 스윙속도가 증가함에 따라 스윙이 없는 경우에 비해 연소기간이 크게 짧아지는 것을 알 수 있으며, 예로서 스윙속도 250 rad/s인 경우는 연소기간이 약 1/4로 단축된다.

2) 플라즈마 제트 점화의 경우도 스윙에 의한 영향을 받고 있으며 스윙속도 증가에 따라 연소기간이 짧아지는 것을 나타내었지만 상용스파크 점화의 경우와 같이 크게 나타나지는 않고있다.

3) 플라즈마 제트 점화의 경우 제트 분출방향에 따른 연소특성에는 큰 차이가 없지만 스윙방향으로의 제트 분출이 반대방향 분출에 비해 연소촉진 효과가 약간 우수하게 나타났다.

4) 스윙속도 증가에 따라 상용 스파크 점화 및 플라즈마 제트 점화의 경우 모두 연소촉진 효과가 상승되어지고 있으며 연소실 중심 방향으로 분출되는 플라즈마 제트 플러그에 의한 연소촉진 효과가 가장 크게 나타났다. 하지만 스윙속도 증가에 따라 그 상승효과는 둔화되고 있는 것을 알 수 있었으며, 상용 스파크 점화 및 플라즈마 제트 점화에 대한 연소촉진율의 차이가 좁혀지는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) H. Yamamoto, S. Horita and T. Matsoka, "Surround Combustion Process(SCP)-New Concept for Lean Burn Engine", SAE 920058, 1992.
- 2) K. Yoshida, H. Shoji and A. Saima, "Influence of the Characteristic Length on Performance of Plasma Jet Igniters", SAE 942051, 1994.
- 3) Y. Ohayama, M. Fujieda and T. Nogi, "A New Spark Ignited Direct Fuel Injection System Provides Greater Ignition Capability", FISITA Technical paper, pp. 88-98. 1994.
- 4) F. B. Carleton, N. Klein, K. Krallis and F. J. Weinberg, "Laser Ignition of Liquid Propellants", Twenty-Third Symposium (International) on Combustion / The Combustion Institute, pp.1323-1329, 1990.
- 5) R. M. Clements, et al., "Chemical Activity and Transport Processes in the Vicinity of a Plasma Jet Igniter". Combustion and Flame 57, pp.265-274, 1984.
- 6) J. E. Orrin, et al., "A Study of Plasma Jet Ignition Mechanism", 18th Symposium (International) on Combustion, pp.1755-1765, 1981.
- 7) R. M. Clements, et al., "An Experimental Study of the Ejection Mechanism for Typical Plasma Jet Igniters", Combustion and Flame 42, pp.65-67, 1981.
- 8) D. R. Topham, et al., "Turbulent mixing induced by a High-Energy Ignition on Device", J. Pys. D, Appl. Phys., 15, pp. 65-67, 1982.
- 9) J. A. Cavolowsky, et al., "Formation of a Plasma puff", SAE 870609, 1987.
- 10) 박정서, 오병진, 김문현, "초회박 연소를 실현하기 위한 플라즈마 제트의 개발", 한국자동차공학회 춘계 학술대회 논문집 B, pp.451-456, KSAE 96380141, 1996.
- 11) J. S. Park, B. J. Oh., M. S. Song and M. H. Kim, "Combustion Characteristics of Plasma Jet in a Constant Volume Vessel", The Ninth International Pacific Conference on Automotive Engineering, pp.135-140, 1997.
- 12) 박정서, 오병진, 김문현, "충류유동장에서 LPG-공기 혼합기에 대한 플라즈마 제트의 점화 연소특성", 한국자동차공학회 논문집, 제7권, 제1호, pp.68-76, KSAE 99370008, 1999.
- 13) 김문현, 유호선, 오병진, 박정서, "플라즈마 제트 플러그 형상이 정적연소기내 연소특성에 미치는 영향", 대한기계학회 논문집, 제 23권, 제 5호, pp.593-602, 1999.
- 14) J. S. Park, H. S. Yoo and M. H. Kim, "Characteristics of Combustion by Means of Multi-Hole Plasma Jet Ignitions", The 15th Internal Combustion Engine Symposium (International), pp.221-226, 1999.
- 15) E. Murase, S. Ono, K. Hanada and S. Nakahara., "Plasma Jet Ignition in Turbulent Lean Mixtures", SAE 890155, pp.183-193, 1989.
- 16) D. N. R. Mittinti, E. Dabora, "Plasma Jet Ignition Studies", twentieth symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.169-177, 1984.