

플라즈마 제트 플러그의 형상이 정적연소기내 연소특성에 미치는 영향

김문현* · 유호선* · 오병진** · 박정서**
(1998년 10월 2일 접수)

Effect of the Configuration of Plasma Jet Plug on Combustion Characteristics in a Constant Volume Vessel

Munheon Kim, Hoseon Yoo, Byungjin Oh and Jungseo Park

Key Words: Plasma Jet Plug(플라즈마 제트 플러그), Constant Volume Vessel(정적연소기),
Flame Visualization(화염가시화), Combustion Enhancement Rate(연소촉진율)

Abstract

This paper presents combustion characteristics of LPG-air mixture ignited by the plasma jet in a cylindrical vessel with constant volume, in which our focus is placed on the multi-hole plug configuration. Four types of the plug configuration depending on the number of orifice and the arranged angle are considered, along with two cases of conventional spark ignition for comparison. Not only the flame propagation is photographed at intervals, but the pressure in the combustion chamber is also recorded through the entire combustion process. The results show that the plasma jet ignition enhances the overall combustion rate remarkably in comparison to the spark ignition by generating irregular flame front and penetrating through the unburned mixture. The combustion enhancement rate agrees favorably with the available data, which supports the validity of our experiment. Synthetically estimating, the two-hole sixty-degree plug appears to be the most desirable, in that the maximum pressure as well as the combustion duration is less affected by the sub-energy level than the others. It is also deduced that there may exist an optimal plug configuration capable of rapid combustion for a specific combustion chamber.

기호설명

하첨자

A : 단면적
 D : 직경
 E_s : 부가에너지
 L : 길이
 L^* : 특성길이
 t : 시간
 V : 체적

c : 플러그 캐비티
 e : 전극
 mp : 최대압력
 o : 오리피스
 ssp : 상용스파크 측면점화

1. 서론

* 회원, 숭실대학교 기계공학과

** 회원, 숭실대학교 대학원

스파크 점화(SI) 기관에서의 회박연소는 연료정
제와 유해 배기가스 저감의 유력한 방법으로서

관심과 대상이 되어 왔다. 이러한 회박연소를 구현하기 위해서는 착화의 신뢰성과 연소속도의 향상이 선행되어야 하기 때문에 Surround Combustion Process,⁽¹⁾ 레이저,⁽²⁾ 다회수,^(3,4) 다화점,⁽⁵⁾ Rail-Plug,^(6,7) 플라즈마 제트에 의한 점화 등 다양한 대안이 제시되어 왔다. 이 중에서 플라즈마 제트는 1970년대에 Wyczalek등⁽⁸⁾이 열핀치효과(thermal pinch effect)를 이용한 초보적인 형태의 플러그를 회박혼합기의 점화에 도입한 이래 기본특성의 규명과 병행하여 실제 기관에 적용하기 위한 연구가 지속되고 있는 과제이다.

플라즈마 제트 점화에 관한 연구를 기초 및 응용연구로 대별할 때 전자는 주로 정적연소기 내부에서의 연소특성에, 후자는 실제 기관의 출력 및 배기성능에 초점을 맞추고 있다. 역사적인 관점에서 이 분야의 특징은 기초연구보다 응용연구가 먼저 시작된 점이다. 응용을 위한 초기연구에서는 연소실의 변형⁽⁹⁾이나 플라즈마 발생장치 개조⁽⁹⁾ 등을 시도하였으나 회박연소의 가능성만을 확인하였을 뿐 연소실 표면적 증가로 인한 유해 배기가스 증가, 침전물로 인한 조기점화 유발 등의 문제로 주목할 만한 성과를 거두지는 못하였다. 계속하여 보조적인 혼합기를 공급하거나 발생장치를 개량하는 형태의 후속연구^(10,11)도 수행되었으나 국소적인 실화 등과 같은 장애를 극복하는 데는 실패한 것으로 보인다.

최근 이러한 문제를 해결하기 위한 노력의 하나로서 Saima와 공동연구자⁽¹²⁻¹⁵⁾는 연소에 영향을 미치는 인자의 수와 인자사이의 상호작용이 적은 정적연소기를 대상으로 플라즈마 제트에 관한 기초연구를 다시 시작하였다. 이들은 기존의 플라즈마 발생장치와는 다른 발생회로를 고안하여 플러그의 형상 및 부가에너지 등의 변화에 따른 연소촉진 효과를 실험하고 순간적으로 분출되는 플라즈마가 미연혼합기를 고속으로 관통함으로써 급격연소가 가능하다고 보고하였다. 국내에서도 독자적으로 제작된 플라즈마 발생장치를 이용하여 전술한 정적연소기내 연소특성을 확인한 바 있으며 관련된 연구를 수행하고 있다.^(16,17) 그러나 지금까지 발표된 대부분의 연구는 제트분출을 위한 오리피스 하나인 단공 플러그에 국한되었다. 단공 플러그의 문제는 회박연소의 경우 플라즈마 제트에 의해 형성된 초기화염핵이 플러그에서 이탈할 가능성이 있고⁽¹⁷⁾ 이것은 실화의 원인

이 된다는 점이다. 이 현상을 방지하기 위한 방법의 하나로서 다공형 플러그를 고려할 수 있다. 다공형 플러그는 각 오리피스에서 분출된 플라즈마 제트가 독립적인 화염가지물 형성함으로써 화염경계면의 면적을 증가시킬 수 있기 때문이다.

본 연구는 플라즈마 제트 점화에 의한 회박연소기관의 실현가능성을 모색하기 위한 기초연구의 하나로서, 오리피스외 수 및 배열이 상이하게 제작된 제트 플러그의 형상이 정적연소기내 연소특성에 미치는 영향에 관하여 실험적 연구를 수행하였다. 부가에너지를 제외한 실험조건은 고정된 상태에서 가시화된 화염과 측정된 압력 자료를 상용 스파크 점화의 경우와 비교, 분석하여 회박연소기관에 적용시킬 수 있는 플라즈마 제트의 설계기반을 구축하고자 한다.

2. 실험

본 연구에서 사용된 실험장치는 Fig. 1에 개략적으로 도시된 바와 같이 정적연소기, 온도조절부, 압력측정부, 플라즈마 제트 점화장치, 가시화장치, 예혼합기 공급장치 및 제어부로 구성된다.

플라즈마 제트 점화장치는 편의상 플라즈마 발생회로와 제트 플러그로 구분하여 기술하기로 한다. 먼저 플라즈마 발생회로는 Fig. 2와 같이 기본적으로 선행연구⁽¹⁶⁾와 동일하기 때문에 그 원리는 약술하였다. 외부의 트리거 신호에 따라 파워 트랜지스터가 작동하면 1차 코일에 약 350 V의 기전력이 발생하고 그 결과 2차 코일에 약 35 kV의 전압이 유도되는 점은 기존의 스파크 점화장

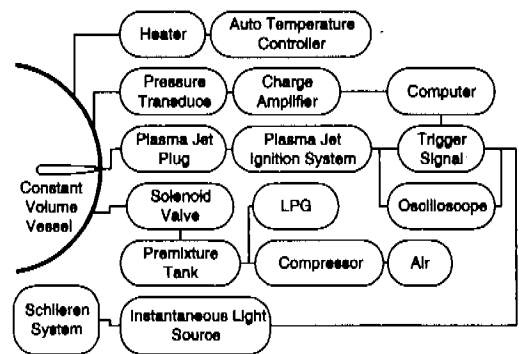


Fig. 1 Block diagram of the experimental apparatus.

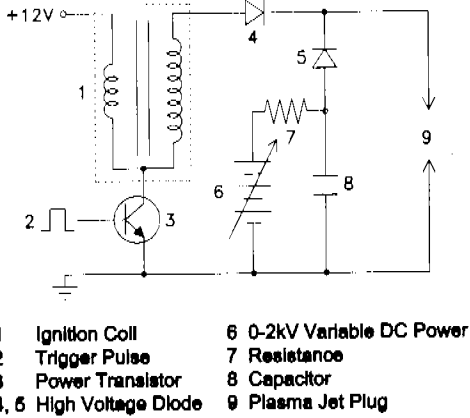


Fig. 2 Circuit of the present plasma jet ignition system.

치와 같다. 그러나 단순한 방전이 아니라 방전에 의해 생성된 이온화된 기체 즉 플라즈마가 후술 될 플러그 캐비티로부터 분출되도록 하기 위해서는 절연파괴(break-down)와 동시에 적절한 수준의 부가에너지(sub-energy or add-on energy, E_s)가 공급되어야 한다. 부가에너지에 의해 캐비티내 기체는 고온의 플라즈마 상태로 되고 급격한 체적팽창에 따라 오리피스를 통하여 제트의 형태로 정적연소기 내부로 방출된다. 용량 C 인 콘덴서, 저항 및 0~2 kV의 가변 전원으로 구성된 보조회로가 부가에너지의 공급 및 조절을 담당한다. 이때 플라즈마 제트의 발생간격은 콘덴서의 충전시간에 따라 결정된다. 충전시간을 단축할 목적으로 저항 R 을 최소화하면 충전초기 전압부의 과부하 문제가, 소용량의 콘덴서를 사용하면 전원의 전압증가에 따른 문제가 발생할 수 있다. 회로에 포함된 고압 다이오드는 두개의 전원을 전기적으로 절연시키는 역할을 한다. 연구의 핵심인 플라즈마 제트 플러그의 형상은 Fig. 3과 같이 오리피스 수 및 사이각에 따라 4개의 서로 다른 경우를 취급하였다. 구체적으로 PJ1은 단공, PJ2A는 2공 60도, PJ2B는 2공 90도, PJ3은 3공 45도이다. 플러그의 전극직경(D_e)과 캐비티 깊이(L_c)는 각각 2 mm로서 모든 경우 캐비티의 체적은 동일하다. 오리피스직경(D_o)은 단공의 경우 1 mm이며, 다공의 경우 오리피스의 총단면적이 단공과 대략적으로 일치하도록 제작하였다. 플러그는 황

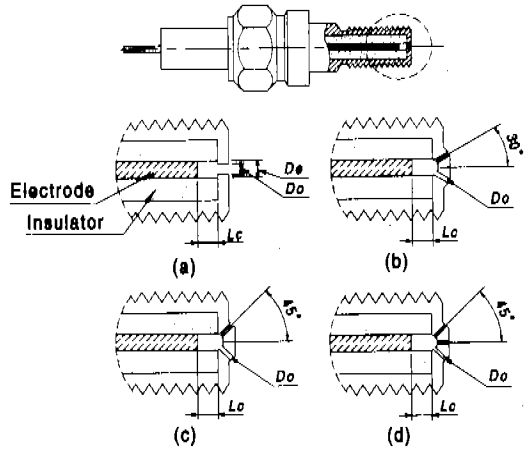


Fig. 3 Configurations of the plasma jet plug: (a) PJ1, (b) PJ2A, (c) PJ2B, and (d) PJ3.

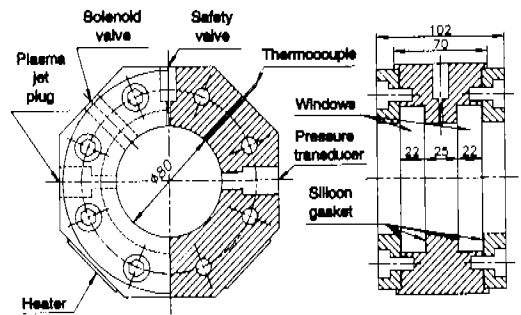


Fig. 4 Drawing of the present constant volume vessel.

동, 전극 절연체는 테플론 재질이다. 플라즈마 제트 플러그에 의한 점화 및 연소특성의 비교기준으로서 상용 스파크 플러그에 의한 측면점화 및 중심점화(각각을 SSP 및 CSP로 표기)도 함께 실험하였다.

정적연소기는 Fig. 4의 도면과 같이 직경 80 mm, 폭 25 mm, 내적 약 125 cc인 얇은 원통형이다. 이러한 형상은 가능하면 실제 기관의 연소실을 모사하기 위함일 뿐만 아니라 구조나 내압성, 사진 촬영 등의 문제로 화염의 3차원적 가시화가 곤란하기 때문에 선택되었다. 사실 2차원적 가시화만으로도 연소의 정성적인 특성은 어느 정도 파악될 수 있기 때문이기도 하다. 정적연소기를 취급한 다른 연구(6,12-15)에서도 치수에는 차이가 있으

나 대부분 원통형을 사용하였다. 화염의 가시화를 위하여 연소기의 전·후면은 굴절률이 작은 두께 22 mm의 광학유리(optical glass)로, 본체는 듀랄루민으로 제작하였으며, 플라즈마 제트 플러그는 측면에서 점화되도록 삽입하였다. 같은 맥락에서 Fig. 3에 도시된 다공 플러그의 오리피스도 연소기의 중간 폭 단면상에 평면적으로 배열하였다. 예혼합기의 충전유량을 제어하기 위하여 솔레노이드 밸브가, 압력 및 초기조건 설정용 내표면온도 측정용 위하여 압력변환기 및 열전대가 각각 장치되어 있다. 또한 보조가열기를 연소기 외부에 설치하여 초기온도를 조절할 수 있도록 하였다.

화염의 가시화를 위한 셔리렌 장치는 직경 300 mm인 오목거울, 평면거울, 순간광원(Ito Coken Co., UHL-102D), 나이프에지, 카메라(Canon, AL1)로 구성된다. 트리거 스위치에서 발생된 신호로부터 시간지연장치를 통하여 정해진 시각에 작동하는 순간광원에 의해 사진이 촬영되도록 제어하였다. 참고로 본 실험장치는 2 μ s간격으로 촬영이 가능하며, 발광은 3 μ s동안 지속된다.

압력변환기에서 감지된 신호는 증폭기를 거쳐 A/D 변환된 후 PC에 저장된다. 또한 플라즈마 제트 점화장치의 전압과 전류변화는 각각 고전압 프로브(P6015A)와 고전류 프로브(A6303)를 이용하여 측정하고, 실시간 디지털 오실로스코프(Tektronix, TDS 380, 400 MHz, 2 Gs/s)를 통하여

오작동 여부를 감시하였다. 플라즈마 발생과정동안 전기적 신호의 변화는 이미 선행연구⁽¹⁶⁾에서 구체적으로 취급된 바 있다. 또한 전술한 발광시간도 같은 오실로스코프를 통하여 단속적으로 확인하였다. 예혼합기 공급장치는 분압에 의한 혼합방식을 채용하였으며 통상적으로 사용되는 형태이기 때문에 구체적인 내용은 생략한다.

플라즈마 제트 플러그의 형상변화에 초점을 맞추기 위하여 모든 경우 실험조건 즉 초기온도, 초기압력, 연료 및 혼합기의 당량비는 각각 313 K, 0.1 MPa, LPG(C_3H_8 70 % + C_4H_{10} 5 % + C_3H_6 25 %) 및 1.0으로 고정하였다. 다만 플라즈마 제트의 분출강도 및 화염전파속도에 영향을 미칠 것으로 예상되는 부가에너지는 2, 5, 10, 15 J로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 상용 스파크 점화시 $E_s=40\sim 50$ mJ인 사실과 비교하면 본 연구의 최소값 2 J은 상당히 큰 값이지만 안정적인 점화를 위하여 그 이하에 대한 실험은 수행하지 않았다. 일단 플라즈마 제트 점화의 유용성이 확인된다면 부가에너지의 최소화가 그 실용화를 위한 중요한 요소가 될 것으로 예상된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염가시화

초기화염핵의 형성에 미치는 플라즈마 제트 플러그 형상의 영향을 보이기 위하여 상용 스파크 플러그에 의한 측면 및 중심점화(이하 SSP 및 CSP로 약칭)의 경우와 Fig. 3에서 제시된 4개의 경우(이하 각각을 PJ1, PJ2A, PJ2B, PJ3로 약칭)에 대하여 점화시작후 0.4 ms 시점에서 가시화된 화염을 Fig. 5에서 비교하였다. 이때 공급된 부가에너지는 모든 경우 5 J이다. 초기화염핵은, 스파크 점화에서는 점화위치 부근에 경계면이 매끈한 형태로 형성됨에 비하여, 플라즈마 제트 점화에서는 플러그 형상에 따른 차이는 있지만 공통적으로 마치 난류와 같이 거친 경계면을 가지면서 미연혼합기를 관통하고 있는 형태이다. 또한 같은 시각에서 2차원적인 화염의 면적이 상대적으로 넓고 화염경계면의 길이도 현저히 길다. 즉 전체적으로 플라즈마 제트 점화의 경우가 스파크 점화에 비하여 초기화염핵이 보다 급격히 형성된다. 특히 다공 플러그에서 분출된 플라즈마 제트가 미연혼합기를 관통하는

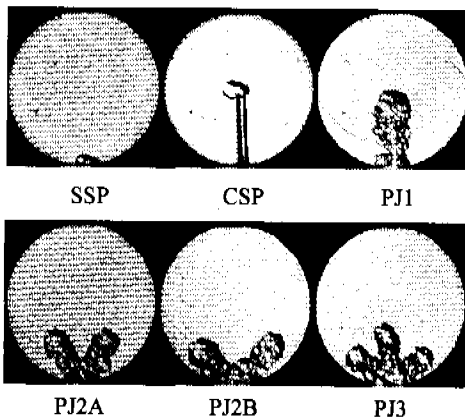


Fig. 5 Schlieren photographs of the flame for different plug configurations at 0.4 ms after ignition in comparison to the conventional spark ignitors ($E_s=5$ J).

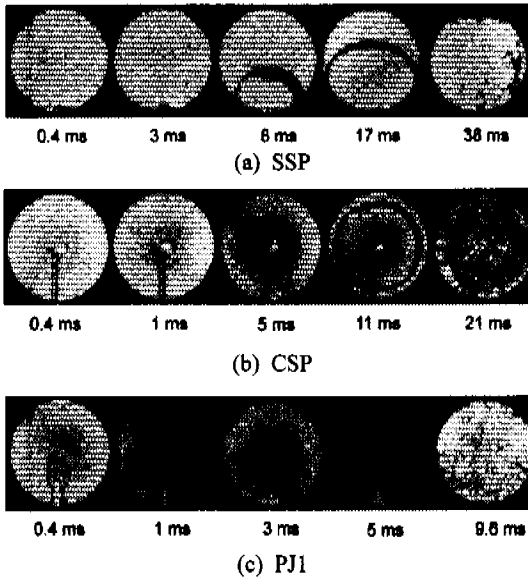


Fig. 6 Comparison of the flame propagation patterns between the spark igniters and a representative plasma jet plug ($E_s=5$ J).

형태와 거친 화염경계면은 다른 연구⁽¹³⁾에서도 관찰된 바 있다. 플라즈마 제트 점화에 국한하여 고찰할 때, 오리피스의 수 및 배열은 초기화염의 형태를 정성적으로는 상당히 변화시키지만 이 단계에서 그 정량적인 효과를 언급하기는 곤란하다. 다만 플라즈마가 넓은 각도로 분출되는 PJ2B와 PJ3에 있어서 점화초기부터 일부 화염이 연소기 벽면에 근접하기 때문에 화염전파 장애 또는 벽면을 통한 열손실이 이후의 연소진행에 어떤 형태로든 영향을 미치게 될 것으로 예상된다.

플라즈마 제트 점화시 시간에 따른 연소진행상태를 고찰하기 위하여 부가에너지가 같은 조건 ($E_s=5$ J) 하에서 대표적으로 PJ1을 선정하고 점화에서부터 화염이 연소기 전체에 전파될 때까지 적절한 시간간격으로 가시화된 결과를 SSP 및 CSP의 경우와 함께 Fig. 6에서 비교하였다. 화염은 점화위치에 따라 SSP의 경우 반원, CSP의 경우 동심원 형태를 유지하며, 경계면은 양자 모두 층류연소와 같이 매끈하다. 반면 PJ1의 경우 점화시 분출된 플라즈마 제트에 의해 플러그에서 연소기 중앙부에 이르는 버섯형의 화염핵이 형성된 후 다소 불규칙적인 형태로 화염선단이 전파되는 연소가 진행된다. 주목할 점은 화염전파 종료시간에서 알 수 있듯이 PJ1의 평균 화염전파속

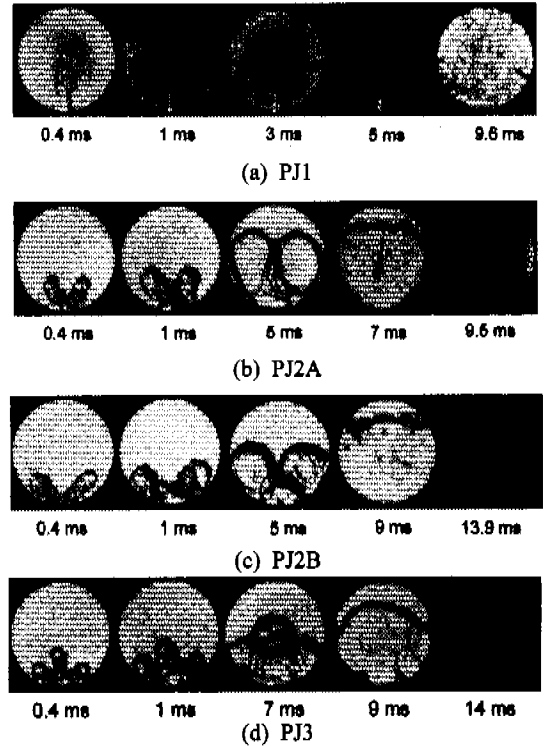


Fig. 7 Time evolution of the flame propagation pattern for each plug configuration.

도가 SSP의 경우보다 4배정도 빠르다는 사실이 다. 이는 외부로부터 공급된 에너지가 같은 조건에서 플라즈마 제트 점화가 스파크 점화보다 급격연소에 효과적임을 보여준다.

같은 조건일 때 플라즈마 제트가 기존의 스파크에 비하여 효율적인 점화방법임을 확인한 다음 단계로서 플러그의 형상에 따른 연소진행 상태를 역시 $E_s=5$ J에 대하여 Fig. 7에서 검토하였다. 비교의 완결을 위하여 Fig. 6에서 이미 취급된 PJ1도 같이 포함시켰다. 다공 플러그의 경우 오리피스 수만큼의 초기화염 가지가 형성되고 시간이 경과하면 화염경계면이 융합되는 점은 공통적이나, 사이각에 따라 연소의 진행형태에는 다소 차이가 있다. 쉽게 예상되는 사실이지만 사이각이 협각인 PJ2A와 PJ3에서 화염가지의 융합은 상대적으로 빠른 시간에 이루어지며, 전체적인 분출각도가 큰 PJ2B와 PJ3은 화염경계면이 연소기 벽면에 쉽게 접하게 된다. 이미 Fig. 5와 관련하여 지적하였듯이 화염경계면이 초기에 벽면에 도

달하면 연소지연이 초래된다. 즉 PJ3의 경우 연소초기 화염면적이 가장 큼에도 불구하고 연소종료시간은 오히려 가장 늦다. 그 원인은 연소중반 이전부터 화염선단이 연소기 벽면에 접촉하여 열손실이 발생하고 화염가지의 조기 융합으로 인하여 정계면의 길이(3차원적으로는 표면적)가 감소하기 때문이다. 같은 관점에서 PJ2A의 경우 비록 화염의 융합은 조기에 일어나지만 PJ1에 비해서는 화염정계면이 넓을 뿐만 아니라 연소종료시까지도 거의 벽면에서 이격된 상태로 유지되기 때문에 본 연구에서 취급된 4경우 중에서 연소종료시간이 가장 짧다. 여기서 모든 경우 연소초기부터 화염은 이미 연소기 전·후면의 광학유리에 접하고 있는 상태이지만, 유리의 열전도율이 원통벽의 두탈루민에 비하여 극히 작고 두께가 상당하기 때문에 충분히 단열된 것으로 추정된다. 이상의 내용을 종합할 때 급격연소를 위해서는 화염정계면이 가능하면 넓고 벽면에는 접하지 않는 플러그가 효율적임을 알 수 있다. 이것은 어떤 연소실의 형상이 주어지면 이에 대한 최적의 플라즈마 제트 플러그 형상이 존재할 수 있음을 의미한다.

다른 조건이 같을 때 부가에너지의 변화가 초기화염핵의 형성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 각 플러그의 형상에 대하여 $E_s=2, 5, 10, 15$ J 인 경우 점화시작후 0.4 ms에서 가시화된 결과를 Fig. 8에 정리하였다. 초기화염핵의 기본적인 형태는 부가에너지의 변화와 무관하게 유사하지만, 당연한 사실로서 부가에너지 증가에 따라 분출된 플라즈마 제트의 관통길이 및 두께는 증가한다. 다만 제트체적의 증가율이 완만하기 때문에 부가에너지의 증가가 연소촉진의 한 방법은 될 수 있으나 한계가 있을 것으로 보인다. 이점에 관해서는 압력변화 및 연소촉진율과 관련하여 구체적으로 후술될 것이다. 전술하였듯이 부가에너지의 최소값을 2J로 국한하였으나 추후 그 감소가 초기화염의 안정성에 미치는 영향에 관해서도 연구할 필요가 있다.

3.2 입력변화

플라즈마 제트 플러그의 형상변화에 대하여 이미 고찰한 화염가시화와 병행하여 Fig. 6과 7에 대응하는 연소기내 압력변화를 측정할 자료가

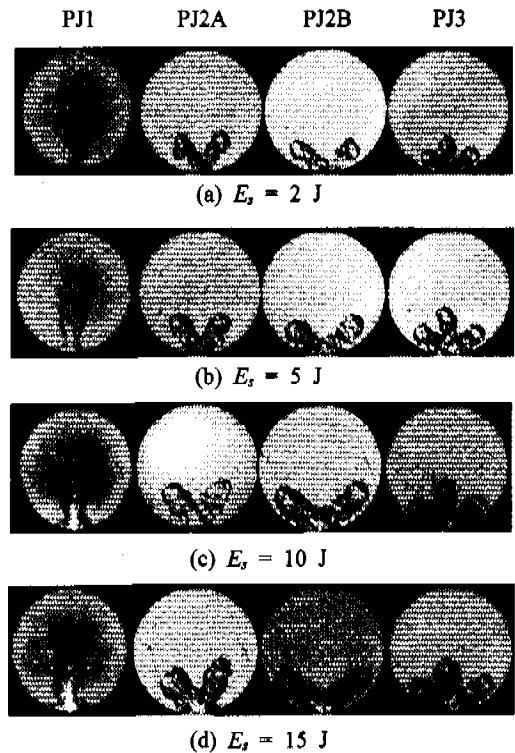


Fig. 8 Effect of the sub-energy on the initial flame shape at 0.4 ms after ignition for each plug configuration.

Fig. 9이다. 여기서 $E_s=5$ J이다. 점화에 따라 압력이 급격히 증가하여 대략 연소종료 시점에서 최대값에 도달한 다음 열손실에 의해 완만하게 감소하는 추이는 모든 경우 유사하지만, 최대값 및 그 도달시간 등 구체적인 형태는 플러그의 형상에 따라 어느 정도 차이를 보인다. 전술한 연소속도와 직결된 결과로서 플라즈마 제트 점화의 최대압력 도달시간은 스파크 점화에 비하여 현저하게 단축된다. 압력의 상승률과 최대값으로부터 판단할 때 PJ1과 PJ2A가 PJ2B와 PJ3보다 효율적인 형상이며, 이점은 화염가시화에서 고찰한 내용과 잘 부합된다. 즉 압력의 상승률은 가지모양 초기화염핵의 융합에 의한 화염정계면의 길이감소와, 최대압력은 화염의 벽면부착에 따른 열손실과 각각 연관된 문제이다. 사실 열역학적으로 혼합기의 당량비 및 충전질량이 같을 때 정적연소기가 완전 단열되었다면 최대압력은 연소속도

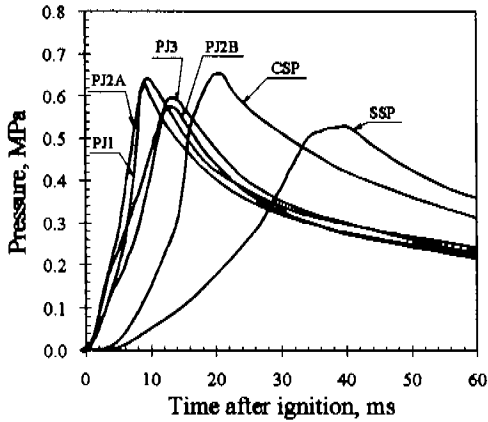


Fig. 9 Variation pattern of the pressure in the vessel for each plug configuration in comparison to the spark ignition cases.

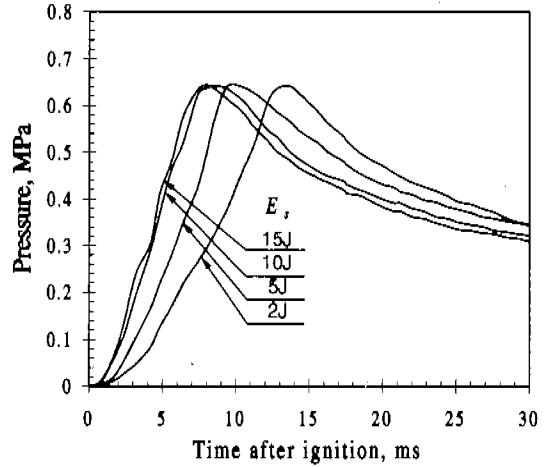


Fig. 10 Effect of the sub-energy on the pressure variation pattern for the PJ2A configuration.

에 무관하게 일정하여야 한다. 같은 관점에서 CSP에서 최대압력의 최고값이 나타나는 현상도 설명될 수 있다. Fig. 6(b)에서 분명하듯이 CSP의 경우 화염경계면이 동심원형으로 전파되기 때문에 연소종료시까지 벽면에 거의 접하지 않고 결과적으로 최대압력은 가장 높게 된다. 다만 연소 속도는 플라즈마 제트 점화에 비해서 느리기 때문에 압력의 상승률은 당연히 완만하다. 가시화된 화염과 압력변화를 함께 고려할 때 본 연구의 연소기 형상에 대해서는 4개의 경우 중에서 PJ2A가 가장 효율적인 플러그 형상으로 판단된다.

압력변화 형태에 대한 부가에너지의 영향을 검토하기 위하여 대표적으로 PJ2A를 선정, $E_s=2, 5, 10, 15$ J인 경우에 대응하는 자료물 Fig. 10에서 비교하였다. 가시화된 화염(Fig. 8)에서 예측될 수 있었듯이 부가에너지의 크기가 압력곡선의 기본적인 형태를 변화시키지는 않는다. 다만 부가에너지의 증가에 따라 압력의 상승률이 보다 급격하게 될 뿐이다. 주목할 점은, $E_s=10$ 및 15 J에 대한 압력 상승률의 차이에서 나타난 바와 같이, 부가에너지가 일정한 수준 이상이 되면 연소 속도의 향상도 거의 없다는 사실이다. 즉 부가에너지증가에 의한 연소속진 방법에는 한계가 있음이 확인된다.

한편 최대압력과 부가에너지사이의 관계물 파악하기 위하여 SSP와 CSP를 포함하여 플러그

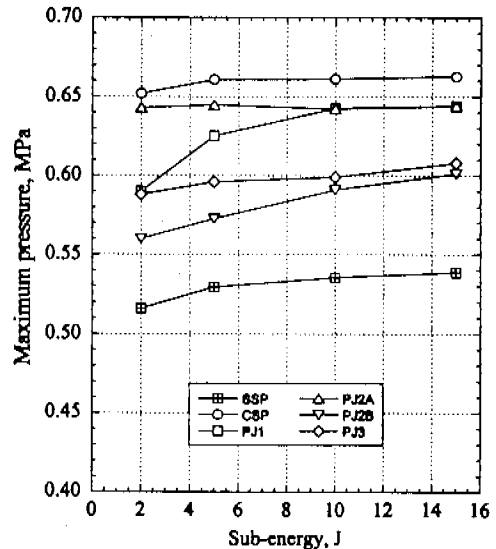


Fig. 11 Variation of the maximum pressure with respect to the sub-energy for all cases.

형상에 따른 측정자료물 Fig. 11에 정리하였다. 점화방법에 따른 최대압력의 상대적인 크기에 관해서는 Fig. 10에서 이미 언급한 바 있으므로 여기서는 부가에너지의 효과에 국한하여 고찰하기로 한다. 정적연소기에서 최대압력은 이론적으로는 부가에너지의 증가에 따라 상승하여야 하며, 측정된 결과도 대체로 같은 경향을 보인다. 그러나 구체적인 의존성은 플러그의 형상에 따라 상

당한 차이가 있다. 그중에서 PJ1과 PJ2A의 경우가 특징적인데, 전자는 부가에너지의 감소에 따라 최대압력이 급감함에 비하여 후자는 Fig. 10에도 나타났듯이 거의 불변이다. 이 결과는 열손실과 연관된 것으로 추정되지만 본 연구의 실험자료만으로는 정확한 원인은 알 수 없으며, 반복 실험에서도 거의 같은 결과가 재현되었으므로 사실로 수긍할 뿐이다. 만일 부가에너지가 2 J보다 낮을 때도 상기 경향이 유지된다면, 저부가에너지 점화를 구현할 플라즈마 제트 플러그의 형상은 PJ2A이지 PJ1은 결코 아니다. 다만 이를 검증하기 위해서는 부가에너지뿐만 아니라 당량비의 광범위한 변화에 대한 연소실험이 반드시 수행되어야 할 것이다. 이상의 결과는 다공 플러그를 최초로 취급한 본 연구의 의의를 잘 보여준다.

3.3 연소촉진율

플라즈마 제트 점화의 연소촉진 효과를 종합적으로 평가하기 위한 지표의 하나로써 연소시간에 근거한 연소촉진율(CER, combustion enhancement rate)⁽¹⁶⁾을 도입하였다. 측정의 편의상 정적연소기 내 연소시간이 최대압력 도달시간과 일치한다고 간주하면, SSP를 기준으로 다른 점화방법에 대한 CER은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$CER = 1 - t_{mp} / t_{mp,ssp} \quad (1)$$

여기서 t_{mp} 는 점화후 최대압력 도달시간을 나타낸다.

부가에너지 변화에 대한 각 플러그 형상의 연소촉진율을 CSP의 경우를 포함하여 Fig. 12에 도시하였다. 비교고찰 및 실험의 타당성검증을 위하여 정적연소기에서 플라즈마 제트 점화에 관한 Yoshida등⁽¹³⁾의 실험결과도 함께 수록하였다. 다만 이들은 플러그 캐비티의 형상 및 크기를 변화시켰기 때문에

$$L^* = V_c / A_0 \quad (2)$$

로 정의⁽¹⁹⁾되는 특성길이 L^* 가 본 연구와 가장 근사한 결과만을 발췌하였다. 여기서 V_c 는 캐비티 체적, A_0 는 플라즈마 분출면적 즉 오리피스 단면적이다. 식 (2)에 따라 계산된 특성길이는 본

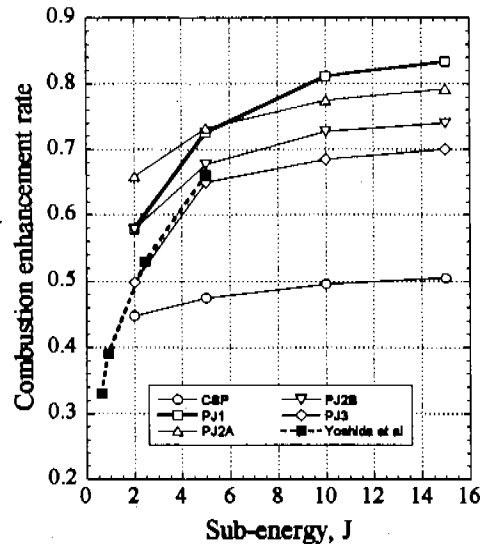


Fig. 12 Dependence of the combustion enhancement rate on the sub-energy for all cases along with the available data.

연구의 경우 플러그 형상에 무관하게 약 8.0 mm 이나 인용된 문헌의 경우 7.11 mm이다. 이들의 실험은 단공 플러그에 국한되었으므로 본 연구의 PJ1과 비교하는 것이 합리적이다. 직접적인 비교가 가능한 범위($E_s = 2 \sim 5$ J)에서 부가에너지의 감소에 따라 연소촉진율이 급격히 저하되는 경향은 양호하게 일치한다. 연소촉진율의 값도 본 연구의 경우가 약간 크기는 하지만 실험자료에 내포된 불확실성을 감안할 때 그 차이는 미미한 수준이다. 오리피스 수가 같고 특성길이는 유사하지만 실제 플러그의 형상 및 크기가 상이함에도 불구하고 양자가 근사적으로 같은 결과를 보인 점은 다음과 같은 사실을 함축한다. 첫째, 식 (2)로 정의된 특성길이는 플러그 캐비티의 특성을 타당하게 반영하는 인자이다. 둘째, Fig. 12에 나타난 정적연소기의 연소촉진율과 부가에너지 관계는 신뢰할 수 있는 결과이다. 셋째, $0 < E_s \leq 5$ J에 대한 이들의 자료를 참조할 때 $E_s < 2$ J에 대한 PJ1의 연소촉진율도 비슷한 값을 보일 것이다.

플러그 형상에 따른 연소촉진율의 부가에너지 의존성도 정성적으로는 전술한 내용과 유사하다. 부가에너지의 증가에 따라 연소가 촉진되는 경향

과 고부가에너지에서 축진율의 증가가 둔화되는 점은 Fig. 10에서 고찰한 내용과도 부합된다. 또한 플라즈마 제트 점화가 전반적으로 스파크 점화에 비하여 연소가 급격한 점도 Fig. 6과 7의 가시화된 화염전파속도에서 이미 파악된 바와 같다. 그러나 정량적인 연소축진율과 부가에너지의 관계는 플라그의 형상에 따라 무시될 수 없는 차이를 보인다. 개략적으로 PJ2B와 PJ3보다는 PJ1과 PJ2A의 연소축진 효과가 크다. 특히 주목되는 것은 PJ1과 PJ2A의 연소축진율이 저부가에너지에서 반전되는 점이다. 추후 검증이 필요하지만 본 실험범위를 벗어난 $E_s < 2$ J에 대해서도 같은 경향이 유지되리라 유추할 수 있다. 반복하여 기술하였듯이 플라즈마 제트 점화를 실제 기관에서 실용화하기 위해서는 부가에너지를 감소시킬 필요가 있다. 이점을 고려할 때 저부가에너지에서 최대압력(Fig. 11) 및 연소축진율(Fig. 12)이 함께 가장 높은 수준을 유지하는 PJ2A가 바람직한 플라그 형상임을 재확인할 수 있다.

4. 결 론

플라즈마 제트 점화에 의한 회박연소기관의 실현가능성을 모색하기 위한 기초연구의 하나로서, 오리피스와 수 및 배열이 상이하게 제작된 제트 플라그의 형상이 정적연소기내 연소특성에 미치는 영향에 관하여 실험적 연구를 수행하였다. 부가에너지를 제외한 실험조건은 고정된 상태에서 가시화된 화염과 측정된 압력 자료를 상용 스파크 점화의 경우와 비교, 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

화염가시화로부터 플라즈마 제트 점화에 의한 화염전파의 형태 및 속도는 같은 부가에너지에서의 스파크 점화에 비하여 현저한 차이를 보인다는 사실이 관찰되었다. 스파크 점화시 화염은 층류연소와 유사하게 매끈한 경계면을 유지하며 반구형 또는 동심원 형태로 단계적으로 진행된다. 반면 플라즈마 제트 점화시 화염은 난류연소와 유사하게 불규칙적인 경계면을 가지며 초기에 오리피스 수만분의 가지를 형성하면서 미연혼합기를 관통하다가 다공 플라그의 경우 상호작용을 하는 형태로 전파된다. 전반적인 화염전파속도는 플라그 형상에 무관하게 스파크 점화보다 빠르

며, 연소종료시간은 화염이 초기에 벽면에 접하지 않고 화염가지의 용합이 늦은 형상일수록 단축된다. 따라서 주어진 연소실에 대하여 최적의 플라그 형상이 존재할 수 있는데 본 연구에서 취급된 경우 중에서는 2공 60도(PJ2A)가 가장 우수한 연소성능을 보인다. 부가에너지의 증가에 따라 화염의 전파는 가속되지만 그 기본적인 형태는 거의 불변이다.

연소기내 압력은 플라그 형상에 무관하게 유사한 형태로 변화한다. 그러나 초기 압력의 상승률은 플라즈마 제트 점화의 경우가 스파크 점화에 비하여 절대적으로, 단공(PJ1) 및 2공 60도(PJ2A)의 경우가 2공 90도(PJ2B) 및 3공(PJ3)보다 상대적으로 급격하다. 이것은 화염가시화에도 부합되는 결과이다. 최대압력의 크기는 연소속도보다는 화염의 벽면부착에 따른 열손실에 의해 지배되는데, 이는 플라그 형상의 설계시 고려되어야 할 사항이다. 부가에너지의 증가에 따라 최대압력 도달시간은 단축되지만 압력곡선 자체는 상사성을 유지한다. 최대압력과 부가에너지의 관계는 플라그의 형상에 따라 상당한 차이를 보이며, PJ2A가 저부가에너지에서도 높은 최대압력을 유지하는 바람직한 형상으로 판단된다.

상용 스파크 축면점화를 기준으로 정의된 연소축진율을 단공 플라그에 국한하여 가용한 실험자료와 비교한 결과 같은 부가에너지의 범위에서 정성적 및 정량적으로 잘 일치함을 확인하였다. 이점은 본 연구의 타당성을 간접적으로 뒷받침한다. 화염가시화 및 압력측정 자료와 일관되게 연소축진율도 PJ1 및 PJ2A가 PJ2B 및 PJ3에 비하여 높게 나타났다. 특히 연소축진율과 부가에너지의 관계 및 상기의 참고자료로부터 저부가에너지에서 PJ2A의 연소축진율이 PJ1보다 높다는 사실을 예측할 수 있었다. 본 연구의 범위 내에서 화염전파속도, 최대압력 및 연소축진율을 종합하여 평가할 때 PJ2A가 스파크 점화는 물론 다른 형상에 비하여 가장 효율적인 플라즈마 제트 플라그 형상이라는 결론에 도달하였다.

후 기

본 논문은 교육부 기계공학 학술연구조성비(과제번호 ME97-A-07)에 의한 연구결과와 일부로서 연구비 지원에 대하여 사의를 표합니다.

