

<논 문> SAE NO. 98370021

## 초회박 연소를 실현하기 위한 플라즈마 제트의 개발

### A Development of Plasma Jet to Realize Ultra Lean Burn

오 병 진\*, 박 정 서\*, 김 문 현\*\*  
B. J. Oh, J. S. Park, M. H. Kim

#### ABSTRACT

The investigation regarding the ignition system of a plasma jet was explored by using a constant volume vessel. The purpose of this study is to elucidate relation between the characteristics of the configuration and jet ejection of plasma jet plug, when the sub energy were supplied at plasma jet ignition system.

From the results of a visualization by the schlieren system, the jet ejection for plasma jet ignition are depended on the jet plug configuration and sub energy, but the configuration of plasma jet plug is more influenced than the sub energy on the plasma jet ejection.

And the plasma jet ignition strongly influences upon the combustion enhancement than the conventional spark ignition.

주요기술용어 : Plasma Jet(플라즈마 제트), Sub-Energy(부가에너지), Ejection Length(분출길이), Electrode Diameter(전극직경), Orifice Diameter(오리피스 직경), Cavity Length(간극깊이)

#### 1. 서 문

스파크 점화기관의 회박연소는 유해 배기가스 저감 측면에서 효과적일 뿐만 아니라 연료소비율을 향상시키므로써 열효율을 증가시킨다. 그러나 회박 혼합기의 연소는 실화(misfire)가 발생되기

쉽고 또한 연소속도가 감소되어 연소변동이 커지게 된다. 안정된 화염핵의 생성률과 생성속도는 전체 연소과정에 직접적으로 영향을 주게되므로 회박연소를 가능하게 하기 위해서는 연소시간의 단축과 착화의 확실성을 증대시키는 방법들이 강구되어야 할 것이다.

이러한 문제를 해결하기 위한 연구로서는 점화 장치의 점화성을 증가시키는 방법과 회박혼합기의 피점화성을 증가시키는 방법으로 대별할 수가

\* 정회원, 숭실대학교 대학원

\*\* 정회원, 숭실대학교 기계공학과

있다.

먼저 희박혼합기의 점화성을 증가시키는 방법으로는 연소실내 혼합기의 유동 제어, 연료분사시기 제어와 이에 따른 연소실 형상의 최적화 등에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>11~14)</sup>

한편 희박연소를 실현하기 위한 점화장치의 점화성을 증가시키는 방법<sup>15~19)</sup>으로서 점화에너지를 증가시키는 것은 이론적으로 간단하지만 희박혼합기로서 화염핵을 형성시켜 화염이 전파될 수 있는 높은 점화에너지를 얻기가 상용의 점화시스템으로는 용이하지 않을 뿐만 아니라 점화 플러그의 내구성이 현저히 떨어지는 단점이 있다.

또한 다수의 점화 플러그를 연소실 벽면에 삽입하여 여러 점화 위치에서 동시에 스파크를 일으키므로서 점화 확률을 높이는 방법은 연소실 구조상의 문제들로 인해 실용상 그 채택이 쉽지 않다.

이러한 문제점을 우회하는 한 방법으로 도입된 것이 플라즈마에 의한 고점화에너지의 공급이다.

미소체적의 플러그 캐비티내의 기체를 고밀도 에너지를 공급시켜 전리시키면 고온의 플라즈마가 발생하여 제트 형태로 순간적인 팽창을 하면서 외부로 분출하게 된다. 발생한 플라즈마 제트는 매우 빠른 속도로 미연 혼합기내를 관통하면서 상용의 점화플러그에서 생성되는 핵보다 더 길고 큰 화염 핵을 형성하게 된다. 따라서 정상 연소의 관건이 되는 연소초기에 안정된 화염핵의 형성 확률 및 속도를 향상시키는 효과가 있게 된다.

또한 제트의 고속침투에 의해 화염전면이 확장됨은 물론이고 점화표면이 고난류화됨으로서 급격연소가 가능해지고 연소율도 증가하는 등 플라즈마 제트에 의한 연소는 희박연소에 적합한 특성을 갖게 된다. 이러한 특성을 이용하기 위하여 다양한 많은 연구들이 수행되었으며, 연소속도의 증가 및 희박하게 확장 등 플라즈마 연소에 대한 긍정적 효과는 공통적으로 보고하고 있다.<sup>10), 11)</sup> 다만 이들 연구의 상당수는 플라즈마 자체의 발생 특성에 국한되었거나<sup>12)~13)</sup> 특정한 환경에서의 연소를 취급하는 등<sup>14)</sup> 극히 제한된 경우에 대한 실험에 그치고 있다. 일부 연구에서는 실제

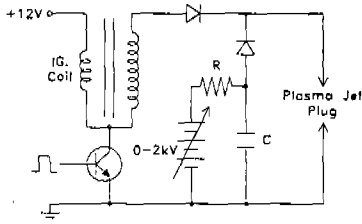
기관에 적용하여 그 결과를 상용 스파크 플러그의 경우와 비교하여 발표한 바 있으나<sup>15)</sup> 같은 조건에 대한 결과가 상이하거나 일관성이 결여되는 등<sup>16)</sup> 아직은 기술적으로 확립된 단계가 아니라고 판단된다. 이와 같이 국외에서의 상당한 관심과는 달리 국내에서의 이러한 연구는 전무한 실정으로서 이에 대한 인식의 제고가 요망된다.

따라서 본 논문은 플라즈마 제트 점화에 의한 초희박 연소기관을 실현하기 위한 전초 단계 연구로서 플라즈마 제트 점화장치를 제작하고 플라즈마 제트의 발광과 분출을 가시화하여 분출 길이와 형상에 미치는 플라즈마 제트 플러그의 설계인자 및 부가에너지의 영향을 파악하므로서 실제 기관에 적용 가능한 최적 플라즈마 제트 발생에 대한 설계기반을 제시하고자 한다.

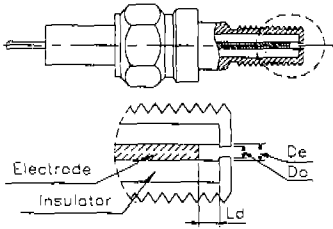
## 2. 플라즈마 제트 점화장치

플라즈마는 열적인 상태로 볼 때 고체, 액체 및 기체 다음으로 존재하는 “제4의 물질”이라고도 말한다. 보통의 기체는 전계를 띤 자유입자를 포함하지 않고 중성적인 입자의 집합체이기 때문에 전기적으로 절연물이다. 그러나 절연파괴가 일어나면 기체는 전자, 양이온 및 중성 원자로 분리되어 있는 도체로 변한다. 일반적으로 전리된 기체는 거시적으로 중성이므로 전자와 양이온 및 중성 원자 수가 같게 된다. 만일 중성에서 벗어나 전자의 수가 양이온수 보다 많다면 그 차이만큼의 부(-)의 공간 전하가 형성되어 전위차가 발생한다. 그 결과로 인하여 전자는 반발되고 양이온은 흡인되어서 전기적으로 중성이 되려고 한다. 이렇게 되어진 안정상태를 플라즈마 상태라고 한다.<sup>17), 18)</sup>

이와 같은 플라즈마 발생 원리를 도입하여 Fig.1과 같이 초희박 연소를 실현시키기 위한 플라즈마 제트 점화장치를 제작하였다. 플라즈마 제트 점화장치는 Fig.1(a)에 나타난 바와 같이 트리거 신호로써 파워 트랜지스터를 구동하여 상용의 1차 점화코일에 약 350V의 기전력을 발생시켜 유도되어진 2차 코일 전압을 이용하여 플라즈마 제트 플러그 간극에서 절연파괴가 일어날



(a) Plasma jet ignition system



(b) Plasma jet plug

Fig.1 Schematic Diagram of Plasma Jet Ignition System and Plasma Jet Plug

수 있도록 구성하였다. 절연과피의 발생으로 인해 제트 플러그의 음극과 양극사이의 기체는 도체가 되며 동시에 콘덴서에 저장된 0~2kV의 부가에너지( $E_s$ : Sub Energy)가 방출되도록 구성하였다. 플라즈마 제트 점화장치의 부가에너지는 콘덴서(C) 용량과 충전 전압을 변화시켜 얻을 수 있다.

Fig.1(b)는 플라즈마 제트 플러그의 형상을 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 절연과피된 양극과 음극사이에 부가에너지를 공급하면 플러그의 간극 사이는 고온으로 되고 자유전자와 양이온으로 구성된 플라즈마가 캐비티 내에서 순간적인 부피팽창을 하여 제트의 형태로 분출된다.

양극 및 음극과 제트 플러그의 모재의 재질은 황동으로 하였고 절연체의 재질은 테프론을 사용하였다. 본 연구의 실험변수는 제트 플러그의 오리피스 직경( $D_o$ : Orifice Diameter), 간극 깊이( $L_d$ : Cavity Depth), 전극 직경( $D_e$ : Electrode Diameter), 부가에너지( $E_s$ : Sub Energy) 및 초기압력(IP: Initial Pressure)으로 하였으며, 사용된 연료는 LPG-공기 예혼합기로서 당량비 1.0이다.

### 3. 실험 장치 및 실험 방법

Fig.2은 실험 장치의 전체적인 구성도이다. 실험장치는 정적연소기를 중심으로 하여 크게 압력 측정부, 플라즈마 제트 점화장치, 예혼합기 공급부, 쉘리엔 광학장치(Ito Coken Co.), 시간지연 장치 및 자동 온도조절장치등으로 구성된다.

실험에 사용된 연소실은 Fig.3과 같이 지름 80mm, 폭 25mm이고 체적이 약 125cc인 원통형 정적연소기로서 재질은 듀랄루민이다. 연소실의 전후면은 가시화가 용이하도록 두께 22mm, 직경이 110mm의 광학유리를 설치하며 정적연소실내의 압력은 압력변환기(Kistler Co. 601A)로 측정된 후 증폭기로 증폭시켜 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력시킨 후 해석한다. 연소시 화염 전파를 가시화하기 위한 쉘리엔 장치는 직경 300mm의 오목거울 및 평면거울과 순간광원(UHL-102D), 나이프 에지, 상용의 스틸 카메라(Canon

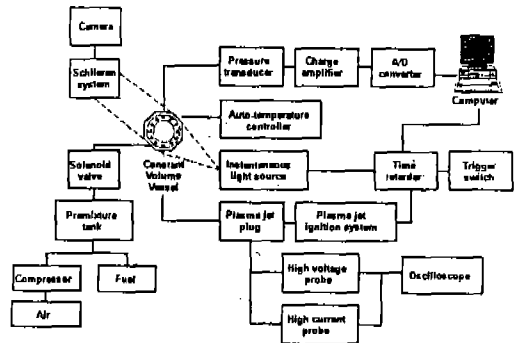


Fig.2 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

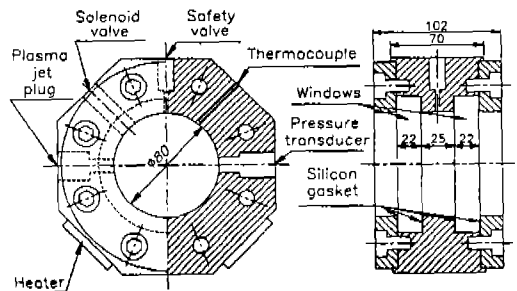


Fig.3 Drawing of Constant Volume Vessel

AL1)로 구성된다. 트리거 스위치에서 발생한 신호는 시간 지연장치를 통하여 순간광원을 발생시켜 각 순간에서의 연소진행 상황을 촬영하며, 동시에 정적연소기내에서 발생되는 압력값을 샘플링하도록 한다. 그리고 플라즈마 제트 접화장치로부터 나오는 전압과 전류측정은 고전압 프로브(P6015A)와 전류 프로브(A6303)를 사용하여 디지털 실시간 오실로스코프(TDS 380, 400 MHz, 2Gs/s)에서 측정하도록 하였다.

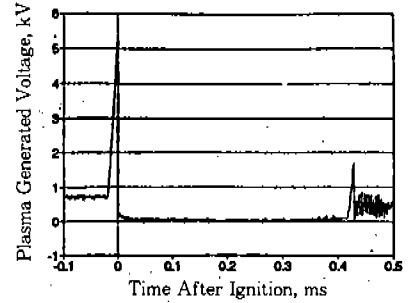
## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 플라즈마 제트 접화장치의 특성

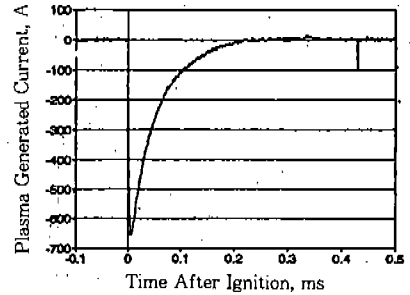
Fig.4는 플라즈마 제트 접화장치에서 발생하는 2차 전압 및 전류 파형과 에너지 및 동력을 나타낸 것이며, 이때의 실험조건은 부가에너지  $E_s=5J$ , 전극직경  $D_e=2mm$ , 오리피스직경  $D_o=2mm$ , 간극깊이  $L_d=2mm$ 인 경우이다. Fig.4(a)은 방전 후 2차 전압파형을 나타낸 것으로서 총 방전기간은 약 1.5ms정도이나 Fig.4(b)에서 보는 바와 같이 2차 전류의 방출이 약 0.4ms내에 이루어지므로 방전후 0.5ms까지만을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 순간 방출 2차 전류가 650A에 달하는 것을 볼 수 있으며, 2차 전류가 방출하는 기간동안 2차 전압의 값은 0V에 가까운 양의 값을 보여준다. 이것은 플라즈마 제트 플러그 캐비티 내부의 기체가 이온화되었기 때문인 것으로 생각된다. Fig.4(c)는 2차 전압 및 전류값으로 구한 동력을 나타내며, 초기 약 5 $\mu s$ 에서 최고 100kW까지 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig.4(d)는 동력 값에 데이터를 취득한 단위시간을 곱하여 얻은 순간에너지의 누적곡선을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 약 0.2ms 부근에서 에너지 방출이 완료되는 것을 볼 수 있으며 그 값은 약 5J 정도이다. 이렇게 가해진 고에너지가 변환되어 플라즈마가 형성되며 이 플라즈마는 발광하며 제트의 형태로 분출되는 것으로 생각된다.

### 4.2 플라즈마 제트의 발광

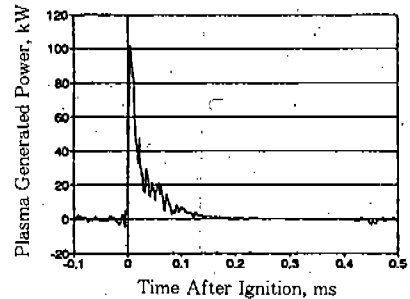
Fig.5는 플라즈마 제트 접화장치에서의 플라



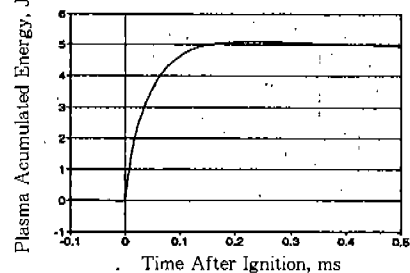
(a) Plasma Generated Secondary Voltage



(b) Plasma Generated Secondary Current



(c) Plasma Generated Power



(d) Plasma Accumulated Energy

Fig.4 Secondary Voltage, Current and Power, Accumulated Energy from Plasma Jet Ignition System as a Function of Time after Discharge at  $E_s=5J$ ,  $D_e=D_o=2mm$ ,  $L_d=2mm$

즈마 제트 발광을 상용 기관의 스파크와 비교하기 위하여 공기 분위기에서 발광기간 전체를 직접 사진으로 영상 처리한 결과이다. 실험조건은 연소실내의 초기압 1bar, 오리피스 직경 1mm 및 간극깊이 2mm일 때 전극직경을 1, 1.4, 2mm 및 부가에너지를 각각 5, 10, 15J로 변화시킨 경우이다.

그림에서 보는 바와 같이 플라즈마의 발광은 부가에너지가 증가함에 따라 분출방향으로의 길이와 그 폭이 넓어지므로 발광면적은 증가되고 있으며, 한편 플라즈마 제트 플러그의 간극깊이 및 오리피스 직경이 동일할 경우 전극직경이 증가할수록 같은 부가에너지에 대해서 분출길이는 감소되고 있음을 알 수 있다. 그리고 동일한 부가에너지를 공급한 상용의 스파크 플러그의 경우와 비교하여 보면 플라즈마 제트 플러그에서 분출되는 제트의 발광길이는 현저히 큰 것을 알 수 있다.

Fig.6은 초기압력에 변화에 대한 플라즈마 발광의 직접 사진을 영상 처리한 것이다. 이 때의 실험조건은 부가에너지를 10J, 제트 플러그의 전극직경 2mm 및 간극깊이 1mm일 때, 제트 플러그의 오리피스 직경을 1, 1.4, 2mm로 변화시킨 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 플라즈마의

발광은 연소실내의 초기압력이 증가할수록 분출방향으로의 길이와 발광면적은 점차 감소되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 초기압력이 일정한 경우 제트 플러그의 오리피스 직경이 증가함에 따라 분출길이와 발광면적이 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

이상의 결과들을 종합하면 플라즈마 제트의 발광은 동일한 캐비티 체적을 갖는 제트 플러그에서는 부가에너지가 클수록, 동일 부가에너지 및 동일한 오리피스 직경에 대해서는 캐비티 체적이 적을수록 분출길이와 발광면적은 증가한다. 캐비티 체적이 적은 경우에 분출길이가 증가되는 것은 캐비티 내부의 기체에 가해지는 에너지 밀도가 증가해서 플라즈마 제트가 확산되는 것으로 생각된다.<sup>13)</sup> 또한 캐비티 체적이 일정한 경우 오리피스의 직경이 클수록 플라즈마 제트의 발광폭도 넓어져 발광면적이 커진다.

4.3 플라즈마 제트의 분출

Fig.7은 비연소장에서의 플라즈마 제트 성장과정의 일 예를 방전이후 0.4ms까지만을 나타내어 상용 플러그의 스파크와 비교한 것이며, 플라즈마 제트의 상은 개별 촬영하여 화상 처리된 것이다. 이 때의 실험조건은 전극직경 및 오리피스

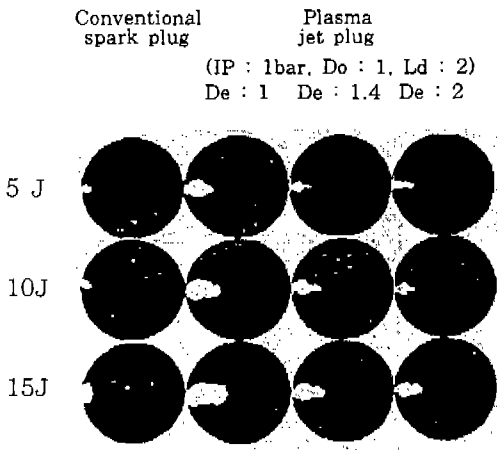


Fig.5 Image Analyzed Results of Plasma Jet Ejection for Various Electrode Diameter and Sub Energy at IP = 1bar, Do = 1mm, and Ld = 2mm

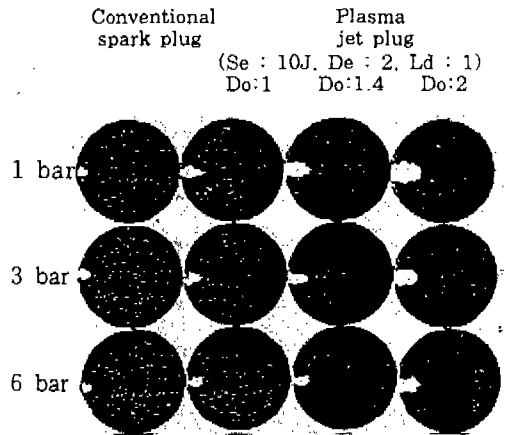


Fig.6 Image Analyzed Results of Plasma Jet Ejection for Various Orifice Diameter and Initial Pressure at Es = 10J, De = 2mm, and Ld = 1mm

직경이 1mm, 간극깊이 2mm인 경우이다. 촬영된 플라즈마 제트 주위는 전체적으로 난류가 나타나고 있으며 이것은 내부에너지가 큰 고압의 플라즈마가 제트의 형태로 분출되기 때문인 것으로 생각되며, 이 난류의 영향으로 주위공기가 제트의 내부로 끌려 들어가서 제트가 성장되는 것으로 믿어진다. 상용 플러그의 스파크와 비교하여 보면 공급에너지는 5J로서 동일하지만 플라즈마 제트는 연소실 중앙부로 아주 깊게 분출되고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig.8은 Fig.7의 가시화한 사진으로부터 플라즈마 제트의 분출길이를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 점화 후 시간이 경과함에 따라 제트의 분출길이는 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 대표적으로 0.4ms에서 플라즈마 제트의

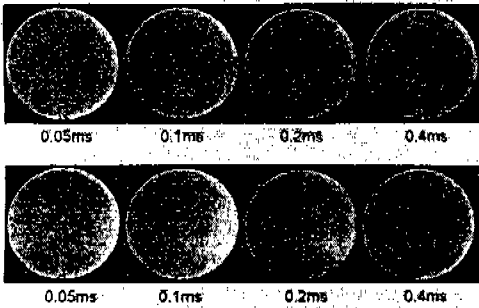


Fig.7 Image Analyzed Results of Plasma Ejection

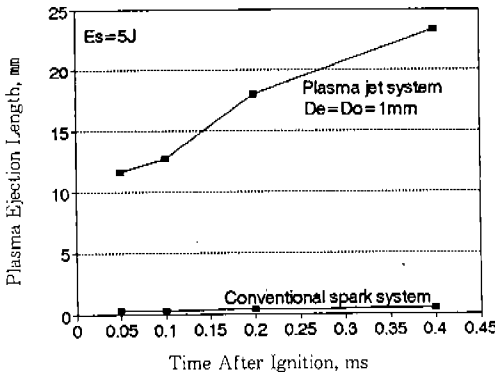


Fig.8 Plasma Ejection Length vs. Conventional Spark in Non-Combustion Field as a Function of Time after Discharge at Es=5J

선단길이는 약 23mm로서 상용 스파크 플러그의 스파크와 비교하면 약 21mm의 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

이것으로 보아 플라즈마 제트 연소는 상용 스파크의 연소보다 점화원이 훨씬 크므로 짧은 시간에 화염핵이 생성될 것이며, 전술한 바와 같이 플라즈마 제트가 미연 혼합기내로 고속 분류 형태로 넓게 퍼져나가므로 연소속도가 빨라질 것으로 생각된다.

Fig.9는 LPG-공기 예혼합기의 연료-공기 당량비 1.0, 연소실내의 초기압력 1bar인 경우, 방전후 2차 전류 방출이 끝나는 시기인 0.4ms에서 플라즈마 제트의 분출에 영향을 미치는 부가 에너지 및 제트 플러그 형상변화에 대하여 나타낸 것이다. Fig.9(a)는 전극직경과 오리피스직경이 1mm, 간극깊이 2mm인 경우이며, 즉 캐비티 체적이 일정할 때는 부가에너지가 증가할수록 플라즈마 제트의 분출길이는 증가되고 있음을 알 수 있

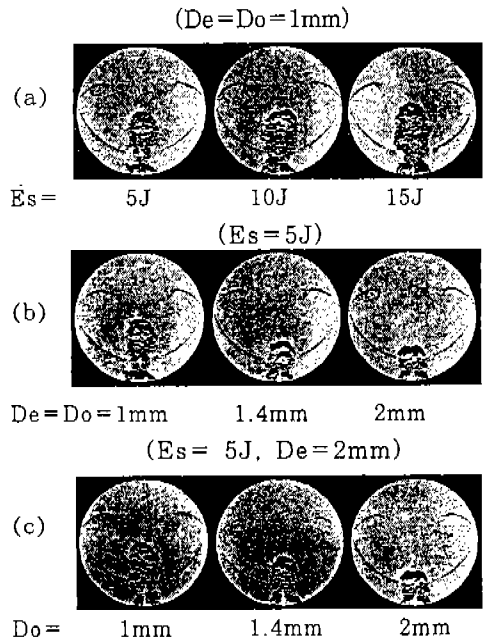


Fig.9 Plasma Jet Ejection for Various Sub Energy and Jet Plug Design Factors in Combustion Field at Time after Discharge 0.4ms, Ld=2mm, IP=1bar, LPG-air Mixture Equivalence Ratio of 1.0

다. Fig.9(b)는  $De/Do$ 비가 1 및 부가 에너지 5J로 일정한 경우인데 그림에서 보는 바와 같이 캐비티 체적이 증가할수록 제트의 분출길이는 감소되고 있다. Fig.9(c)는 동일한 부가에너지 및 캐비티 체적이 일정한 경우이며 이 때 제트 플라그의 오리피스 직경이 감소함에 따라 제트의 분출길이가 길어지는 것을 알 수 있다. 한편 방전 후 동일한 시간 경과에서의 제트 분출 형상을 Fig.8의 비 연소장의 경우와 비교하여 보면 연소장에서의 플라즈마 제트 분출길이가 폭이 증가되고 있음을 볼 수 있는데 이것은 플라즈마 제트가 미연혼합기내로 관통하면서 이미 초기 화염면을 형성시켜 연소가 진행되고 있기 때문인 것으로 판단된다.

Fig.10은 Fig.9에 대한 결과를 도표화한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 캐비티 체적이 일정한 경우 부가에너지가 15J에서 5J로 1/3 감소될 때 제트의 분출길이는 약 4.2mm밖에 감소되지 않는다. 그러나 부가에너지가 일정할 때 캐비티 체적이 적을수록 또한 캐비티 체적이 일정할 때 오리피스 직경이 적을수록 제트의 분출길이는 크게 증가하므로 이들 결과로부터 부가에너지 변화보다는 플라즈마 제트 형상변수인 전극길이와 오리피스 직경 변화가 플라즈마 제트의 분

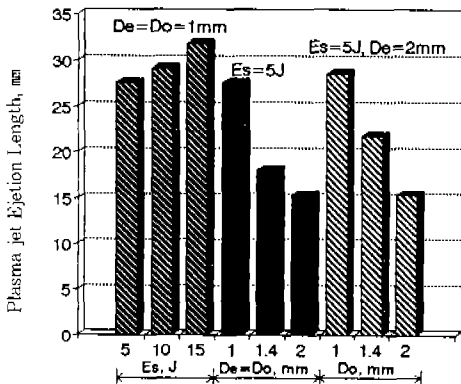


Fig.10 Plasma Jet Ejection Length for Various Sub Energy and Jet Plug Design Factor in Combustion Field at Time after Discharge 0.4ms,  $L_d=2.0$ mm,  $IP=1$ bar, LPG-air Mixture Equivalence Ratio of 1.0

출길이에 크게 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다. 방전후 0.4ms, 부가에너지 5J 및 전극직경과 오리피스 직경이 1mm, 간극깊이 2mm의 경우 분출길이는 약 28.5mm가 되고 있다.

Fig.11은 상용의 스파크 연소와 플라즈마 제트 연소에서의 연소실내 압력경과곡선을 나타낸 것이다. 이 때의 실험조건은 LPG-공기 예혼합기 당량비=1.0,  $IP=1$ bar에서 플라즈마 제트 플라그의 형상변수를  $De=2$ mm,  $Do=1$ mm 및  $L_d=2$ mm로 하고  $E_s$ 를 각각 2, 5, 10, 15J로 한 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 플라즈마 제트 연소의 경우는 부가에너지가 증가할수록 최고 연소압력은 증가하며 최고 연소압력이 발생하는 시기도 빨라지고 있음을 알 수 있다. 그러나 상용의 스파크 점화장치에서는 부가에너지 증가의 효과는 미약하다.

부가에너지 5J인 경우 플라즈마 제트 연소와 상용 스파크 연소의 최고 연소압력은 각각 5.9bar, 5.3bar로 상용 스파크 연소의 최고 연소압력을 기준으로 비교하면 플라즈마 제트 연소의 최고 연소압력은 11.3% 증가하며, 최고 연소압력이 발생하는 시기는 플라즈마 제트 연소가 10.6ms로서 상용 스파크 연소의 41.6ms보다 약 31ms 단축되고 있는 것을 알 수 있다. 따라서

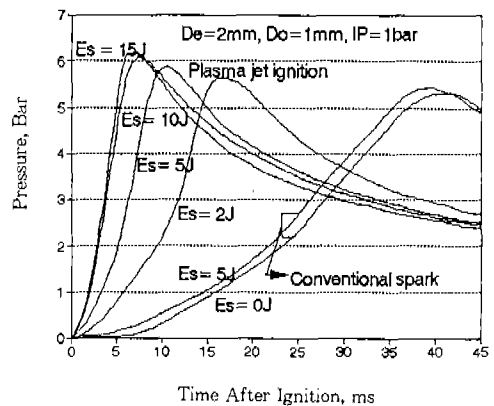


Fig.11 Pressure Rise with Time from Discharge for Plasma Jet Ignition at  $De=2.0$ mm,  $Do=1$ mm,  $L_d=2$ mm and Conventional Spark Ignition as a Function of Sub Energy in  $IP=1$ bar, LPG-Air Mixture Equivalence Ratio of 1.0

상용 스파크 점화장치와 비교할 때 플라즈마 제트 점화장치는 연소속도를 증가시키고 또한 연소실내에서 효율적인 에너지 변환을 시킬 수 있으리라 판단된다.

## 5. 결 론

이상과 같이 초회박 연소를 실현하기 위하여 플라즈마 제트 점화장치를 개발하고, 플라즈마 제트의 발광과 분출을 가시화하여 플라즈마 제트의 분출길이와 형상에 미치는 설계인자 및 부가에너지의 영향을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 개발한 플라즈마 제트 점화장치는 전극직경, 오리피스 직경 및 간극깊이가 2mm인 플러그에 대하여 부가에너지를 5J을 가할 때, 순간 방출 2차 전류는 650A에 달하며 방전기간은 약 0.4ms이다. 동력값은 방전 후 5  $\mu$ s에서 100kw까지 증가하며, 약 0.2ms부근에서 에너지 방출이 완료되고 그 값은 약 5J 정도이다.
- 2) 플라즈마의 발광은 동일한 캐비티 체적을 갖는 제트 플러그에서는 부가에너지가 클수록, 동일 부가에너지 및 동일한 오리피스 직경에 대해서는 캐비티 체적이 적을수록 분출길이와 발광면적이 증가한다. 또한 캐비티 체적이 일정한 경우 오리피스 직경이 클수록 플라즈마 제트의 발광폭도 확산되어 발광면적이 커지며, 한편 연소실내의 초기압력이 증가할수록 분출방향으로의 길이와 발광면적은 감소된다. 그리고 동일 부가에너지를 공급한 상용의 스파크 플러그의 경우와 비교하여 보면 플라즈마 제트 플러그에서 분출되는 제트의 발광길이가 현저히 크다.
- 3) 공기분위기에서 분출된 플라즈마 제트 주위는 전체적으로 난류가 형성되고 있으며 이 제트는 미연 혼합기내로 고속 분류 형태로 넓게 퍼져나간다. 전극직경 및 오리피스 직경 1mm, 간극깊이 2mm 방전후 0.4ms에서 플라즈마 제트의 선단길이는

약 23mm이며 상용 스파크 플러그의 스파크와 비교하면 약 21mm 정도 크다. 따라서 플라즈마 제트 연소는 상용의 스파크의 연소보다 점화원이 훨씬 크므로 짧은 시간에 화염핵이 생성될 것이며 연소속도가 빨라질 것으로 사료된다.

- 4) 방전후 동일한 시간 경과에서의 제트 분출 형상을 비 연소장의 경우와 비교하여 보면 연소장에서의 플라즈마 제트 분출길이와 폭이 증가되고 있다. 이것은 플라즈마 제트가 미연혼합기내로 관통하면서 이미 초기 화염면을 형성시켜 연소가 진행되고 있기 때문인 것으로 판단된다.
- 5) 플라즈마 제트 연소의 경우 부가에너지가 증가할수록 최고 연소압력은 증가하며 최고 연소압력이 발생하는 시기도 빨라져 급속 연소가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 예로서 LPG-공기 혼합기 당량비=1.0, IP=1bar에서 플라즈마 제트 플러그의 형상변수를  $De=2mm$ ,  $Do=1mm$  및  $Ld=2mm$ , 부가에너지 5J인 경우 플라즈마 제트 연소와 상용 스파크 연소의 최고 연소압력은 각각 5.9bar, 5.3bar로 상용 스파크 연소의 최고 연소압력을 기준으로 비교하면 플라즈마 제트 연소의 최고 연소압력은 11.3% 증가하며, 최고 연소압력이 발생하는 시기는 플라즈마 제트 연소가 10.6ms로서 상용 스파크 연소의 41.6ms보다 약 31ms 단축되고 있다.

## 참 고 문 헌

1. Y. S. Song, J. W. Hong, J. T. Lee, B. J. Oh, M. H. Kim, "A Study on Turbulence Formation during Intake and Compression Process in Rapid Intake Compression Expansion Machine", FISTA, Technical paper, pp. 116~123, 1994. 10.
2. 송영식, 조기환, 김문헌, 이종태, "압축과정 중 보조분사가 있는 연소실에서 점화플러그 근방의 난류유동 특성", 한국자동차공학회



- 춘계학술대회, pp. 259~265, 1995.
3. 김문현, 김영효, 이종태, “초기연소과정에 미치는 난류강도 및 점화에너지의 영향”, 한국자동차공학회 논문집, 제3권, 제6호, pp. 265~274, 1995.
  4. 오병진, 김영효, 김문현, 이종태, 이성렬, “미립화 메탄올 연료의 층류연소속도”, 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, SAE No. 923934, pp. 254~259, 1992.
  5. Hiroyuki Yamamoto, Shigeo Horita, and Tsutomu Matsuoka, “Surround Combustion Process(SCP)-New Concept for Lean Burn Engine”, SAE paper, No. 920058, pp. 91~102, 1992.
  6. 이상준, 나성오, 한성빈, 김문현, 이종태, “SCP의 연소특성”, 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 487~492, 1993.
  7. J. A. Harrington, R. C. Shishu, and J. R. Asik, “A Study of Ignition System Effects on Power, Emissions, Lean Misfire Limit, and EGR Tolerance of a Single Engine-Multiple Spark versus Conventional Single Spark Ignition”, SAE paper, No. 740188, pp. 837~845, 1974.
  8. 井九五, 中井明朗兒, 中川泰彦, “火花放電時間と燃燒の安定性”, 自動車技術, Vol. 39, No. 4, pp. 397~403, 1985.
  9. J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book Co., pp. 413~423, 1983.
  10. Floyd A. Wyczalek, Daniel L. Frank, and John G. Neuman, “Plasma Jet Ignition of Lean Mixtures”, SAE paper, No. 750349, pp. 856~868, 1975.
  11. D. M. Hensinger, J. A. Maxson, and A. K. Oppenheim, “Jet Plume Injection and Combustion”, SAE paper, No. 920414, pp. 571~580, 1992.
  12. Koji Yoshida and Atsushi Saima, “Influence of Electrical Supplied Energy and Characteristics Length on the Plasma Jet Ignition”, SAE paper, No. 932750, pp. 1~12, 1993.
  13. Koji Yoshida, Hideo Shoji, and Atsushi Saima, “Influence of the Characteristics Length on Performance of Plasma Jet Igniters”, SAE paper, No. 942051, pp. 1~11, 1994.
  14. Arun S. P. Solomon, “Plasma-Jet Ignition of Fuel Sprays in a Rapid Compression Machine”, SAE paper, No. 880205, pp. 1~15, 1988.
  15. J. R. Asik, P. Piatkowski, M. J. Foucher, and W. G. Rado, “Design of a Plasma Jet Ignition System for Automotive Application”, SAE paper, No. 770355, pp. 1516~1530, 1977.
  16. E. Murase, S. Ono, K. Hanada and S. Makaha, “Plasma Jet Ignition in Turbulent Lean Mixtures”, SAE paper, No. 890155, pp. 1~11, 1989.
  17. 박덕규, 플라즈마 및 핵융합 물리학, 형설출판사, pp. 13~39, 1985.
  18. 田春生, 放電・高電壓工學, 동명사, pp. 211~213, 1995.