

정적연소실내에서의 플라즈마 제트 점화에 대한 연소기간중의 열손실산정

김 문 현^{*1)} · 문 경 태²⁾ · 박 정 서²⁾ · 김 흥 성²⁾

송실대학교 기계공학과^{*1)} · 송실대학교 대학원²⁾

Evaluation of Heat Loss by Means of Plasma Jet Ignition during Combustion Duration in the Constant Volume Vessel

Munheon Kim^{*1)} · Kyungtae Mun²⁾ · Jungseo Park²⁾ · Hongsung Kim²⁾

^{*1)}Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering Graduate School, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received 14 August 2002 / Accepted 10 January 2003)

Abstract : In this paper, the heat loss to the constant volume vessel wall was investigated using instantaneous heat flux sensor, schlieren visualization, pressure rise curve. And the heat loss characteristics of plasma jet ignition were compared with conventional spark ignition. In case of plasma jet ignition, the flame kernel moves toward the center of combustion vessel in the initial period of combustion, and the flame surface spread out to the vessel wall. However, in case of conventional spark ignition, the flame surface contact with combustion vessel wall in the initial period of combustion. As a result, heat loss in the combustion duration for conventional spark ignition increase faster than that of plasma jet ignition. And the combustion enhancement rate of plasma jet ignition is higher than that of conventional spark ignition, and it was found that the heat loss rate is inversely proportional to the combustion enhancement rate.

Key words : Plasma jet ignition(플라즈마제트점화), Instantaneous heat flux sensor(순간열유속센서), Schlieren visualization(월리렌가시화), Constant volume vessel(정적연소기), Heat loss(열손실), Swirl velocity(스윙속도)

Nomenclature

n : harmonic number
 q : heat flux, MW/m²
 T : temperature, K
 δ : distance of in-depth junction

Subscripts

mp : maximum pressure
 w : wall surface

1. 서론

플라즈마 제트 점화에 의한 연소는 연소초기에 연소실 중심부로의 플라즈마 제트가 분출되어 고난류 점화원이 형성됨으로 인한 활성화중 효과와 유체 역학적 효과로서 급격연소를 이룬다.^{1,2)} 연소실 내 압력은 공급된 연료의 연소에 따른 발생열량에 의해서 증가하지만 동시에 연소기간 중에 벽면으로의 열손실로 인해 연소 최고 압력이 감소된다.³⁾ 연소기간 중의 연소실내의 열손실을 최소화하기 위해서는 연소가스가 벽면에 접하는 열전달 면적이 작아야

* To whom correspondence should be addressed.
mhkim@ssu.ac.kr

하며 연소기간 중에 벽면에 접촉하는 시간을 단축시켜야 한다. 플라즈마 제트 점화⁴⁾는 연소기간중의 연소가스가 연소실 벽면과 접하는 열전달 면적을 줄일 수 있고 급격연소를 이루므로 연소기간중의 열손실을 최소화 하는데 매우 효과적이다. 그러나 아직까지 플라즈마 제트 점화에 따른 연소기간 중의 열손실에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 정적 연소기를 대상으로 하여 연소기간중의 플라즈마 제트 점화와 상용 스파크 점화에 대한 열손실을 평가하고자 한다. 이를 위해 순간열유속 센서를 제작하여 연소실 벽면에서의 6지점에 삽입하고 이로부터 측정된 연소실 벽면에서의 순간온도를 기준으로 열유속을 산정한다. 또한 연소기간중의 열손실을 평가하기 위해서는 정량적으로 정확한 열유속 산정값이 요구된다. 본 연구는 정적 연소실 내에서의 열손실을 정량화 하는데 필요한 방법을 제시하고, 연소기간 중의 손실열량을 상용 스파크 점화의 경우와 플라즈마 제트 점화의 경우에 대해 비교 평가하였다.

2. 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 전체적인 개략도를 나타낸다. 정적연소기를 중심으로 예혼합기 공급장치, 플라즈마 제트 발생장치, 스윙발생장치, 순간열유속 측정장치, 온도조절장치, 압력측정장치 및 쉐리엔 가시화장치로 구성된다.

실험에 사용된 정적연소기는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 직경 80mm, 폭 25mm의 원통형으로서 예혼합기의 스윙발생을 위해 흡입밸브를 연소실의 접선 방향으로 설치하였다. 연소실의 전·후면은 가시화가 용이하도록 두께 22mm의 무굴절 광학유리를 설치하였으며 연소실 벽면에서의 열유동 특성 연구를 위해 자체 제작한 순간 열유속센서를 그림에 P1~P6으로 나타낸 6지점에 삽입하였다.

연소실내의 압력 변동값의 측정은 압력변환기(Kistler Co. 601A) 및 증폭기(Kistler Co. Charge Amplifier Type-5011)를 거쳐 A/D변환기를 통하여 컴퓨터에 입력시킨 후 해석하였다. 연소초기온도를 일정하게 유지하기 위해 K-type 열전대 및 히터를 설치하여 제어하였으며 모든 실험의 연소초기온도를

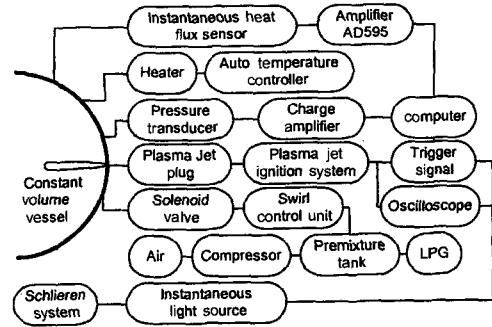


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

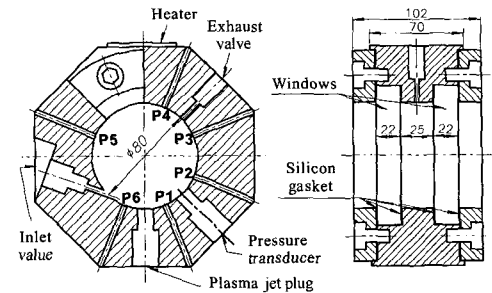


Fig. 2 Schematic diagram of constant volume vessel

313 K로 일정하게 유지하였다. 또한 매 실험마다 일정한 양의 혼합기 공급 및 배기가스 배출을 위해 컴퓨터로 제어되는 솔레노이드 밸브 및 진공펌프를 사용하였으며 정적연소기 내에서 충분한 소기가 이루어진 후 연소초기압력 0.1MPa이 유지되도록 수은 마노메타를 이용한 기초실험을 근거로 흡·배기 솔레노이드 밸브를 제어하였다.

Fig. 3은 실험에 사용된 플라즈마 제트 플러그를 나타낸다. 플라즈마 제트 플러그의 형상치수로서 두 전극 사이의 간격을 뜻하는 캐비티의 깊이 L_c 는 2mm, 캐비티의 직경과 같은 의미인 전극의 직경 D_e 는 2mm로 하였으며 오리피스 직경 D_o 는 이전의 연구⁵⁾에서 가장 좋은 결과를 나타낸 1mm로 하였다.

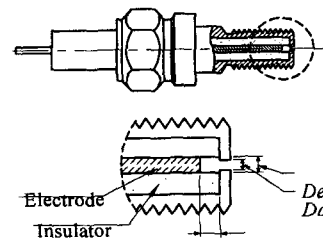


Fig. 3 Schematic diagram of plasma jet plug

연소실 내의 스윙속도 변화를 위해 스윙발생장치를 제작하였으며 이 장치는 470cc의 에어실린더, 정적 연소기의 흡·배기밸브와 3개의 슬레노이드 밸브 및 압력계로 구성하였고 연소실내의 스윙속도 분포는 이전의 연구⁶⁾에서 밝힌 바 있다.

연소실 벽면으로의 열유속은 Fig. 4에 나타난 순간 열유속 센서를 제작하여 연소실 벽표면의 순간 온도를 측정하였다. 순간 열유속 센서는 직경 4mm의 원통형 몸체의 중심에 직경 1.2mm의 구멍을 가공하고 직경 0.32mm의 K-type 열전대 소선을 삽입하여 세라믹으로 고정시키고 표면에 10 μ m 두께의 니켈을 도금하여 순간적으로 변화되는 벽표면의 순간 온도를 측정할 수 있도록 표면접점(surface junction)을 구성하였다. 벽면 내부의 정상상태 온도를 측정하기 위하여 벽표면 온도변동의 영향이 미치지 않는 $\delta=4$ mm의 깊이내 내부접점(in-depth junction)을 설치하였다.⁷⁾

순간 열유속 센서로부터의 출력신호는 냉점점 보상회로를 내장하고 1 $^{\circ}$ C당 10mV의 출력을 제공하는 K-type 열전대의 전용 증폭기인 AD595칩을 사용하여 증폭하고 컴퓨터의 A/D변환기로 받아들여 해석하였다. 이렇게 구성된 순간온도 측정 장치의 검증을 위해 전기로 및 표준온도계를 이용하여 표면접점과 내부접점의 정상상태 온도값에 대한 기초실험을 수행하였으며 정도가 우수한 출력값을 확인할 수 있었다.

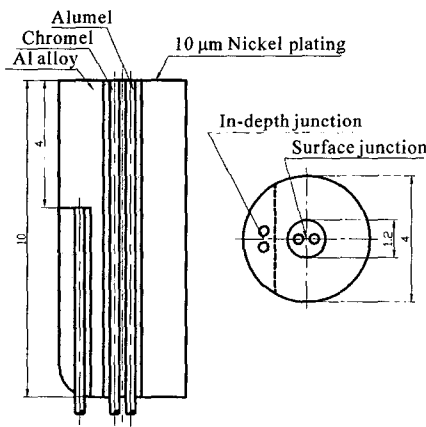


Fig. 4 Schematic diagram of instantaneous heat flux sensor

3. 열유속 산정방법

3.1 순간온도 특성

Fig. 2에 나타난 연소실 벽표면의 6지점에 순간 열유속 센서를 설치하고 플라즈마 제트 점화 및 상용 스파크 점화에 의한 연소실 벽표면에서의 순간 온도 특성을 Fig. 5 및 Fig. 6에 쉐리렌 가시화 사진과 함께 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 점화 후 화염전파에 따라 화염면이 순간온도센서가 설치된 위치에 도달할 때 그 위치에서의 벽표면 온도가 급격하게 상승하고 있으며 각각의 위치에 따라 온도 진폭의 크기는 약간씩 다르게 나타내고 있다. Fig. 5에 나타난 상용스파크 점화의 경우 화염면이 연소실 벽면에 접하면서 반구형으로 진행되어 연소실 벽표면에 접할때 벽표면온도가 상승하고 있는 점을 고려하면 연소기간중의 열손실이 Fig. 6의 플라즈마 제트 점화의 경우에 비해 큰 값을 나타낼 것으로 예측된다. 본 연구에서는 6지점의 순간온도 값의 공간 평균 값을 기준으로 연소기간 중 연소실 벽표면으로의 열유속을 구하고 손실열량을 파악하였다.

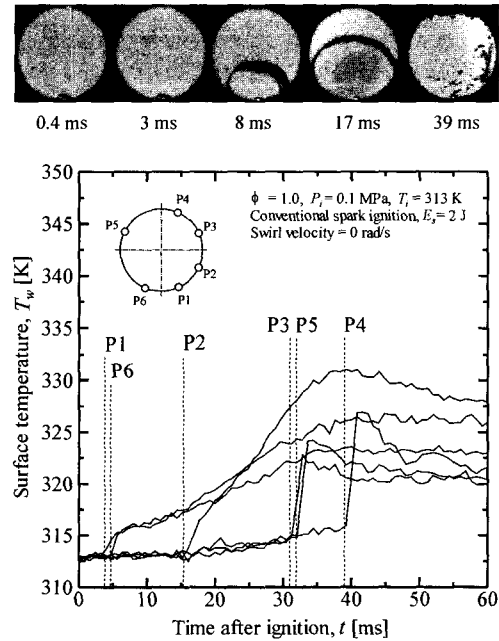


Fig. 5 Schlieren photographs and instantaneous surface temperature by means of conventional spark ignition

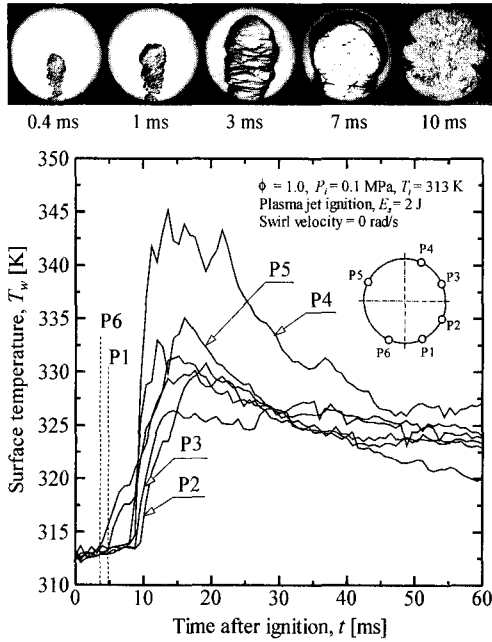


Fig. 6 Schlieren photographs and instantaneous surface temperature by means of plasma jet ignition

3.2 열유속 계산식

연소실 벽표면에서 측정된 순간온도 값을 기초로 비정상 열유속을 계산하기 위한 방법은 선행연구자들^{8,9)}이 제시한 방법을 이용하였다. 계산은 정적 연소실 벽면에서의 열전달을 1차원 비정상 열전도로 가정하고 다음과 같은 1차원 열확산 방정식(heat diffusion equation)¹⁰⁾을 사용한다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서 x 는 내벽면의 수직방향 거리, a 는 벽면재료의 열확산계수이다.

식 (1)에서 측정된 벽표면 순간온도와 임의 깊이의 온도를 경계조건으로 하고, 주기함수를 이용하면 거리 x 와 시간 t 에 대한 벽면의 순간온도는 다음과 같은 연속함수로 나타낼 수 있다.

$$T(x, t) = T_w(0) - \{T_w(0) - T(\delta)\} \frac{x}{\delta} + \sum_{n=0}^{\infty} e^{-Fx} \{A_n \cos(nwt - Fx) + B_n \sin(nwt - Fx)\} \quad (2)$$

여기서 $F = -\sqrt{nw/2\alpha}$ 이며, A_n, B_n 은 푸리에계수를

나타낸다.

따라서 식 (2)으로부터 $x = 0$ 인 표면접점에서의 열유속은 다음과 같이 얻어진다.

$$q_w(t) = -k \left[\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right]_{x=0} = \frac{k}{\delta} [T_w(0) - T(\delta)] + k \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{\frac{nw}{2\alpha}} \cdot [A_n \{ \cos(nwt) - \sin(nwt) \} + B_n \{ \sin(nwt) + \cos(nwt) \}] \quad (3)$$

여기서 k 는 벽면재료의 열전도 계수이다.

Fig. 7은 식 (2)을 기초로한 시간 t 에 대한 연소실 벽표면의 순간온도를 하모닉수 변화에 대하여 나타낸 것이며, 이 때 사용한 벽표면 순간온도값은 6지점의 순간온도값을 공간 평균한 값이다. 하모닉수 n 값을 5, 10, 30으로 증가시키에 따라 순간온도값이 변하여 그림에서 보는 바와 같이 하모닉수 30에서 실측값과 거의 같은 결과를 나타내고 있다. 하모닉수를 변화시켜 계산된 열유속값의 변화를 Fig. 8에 나타내었으며 하모닉수가 증가 함에 따라 열유속 최고값도 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 열유속 최고값은 하모닉수를 증가시키에 따라 크게 증가하고 있으나 하모닉수 30 이상에서는 열유속 최고값의 증가는 둔화되고 있으며 하모닉수 60인 경우는 하모닉수 30인 경우에 비해 약 6%정도 증가하고 있지

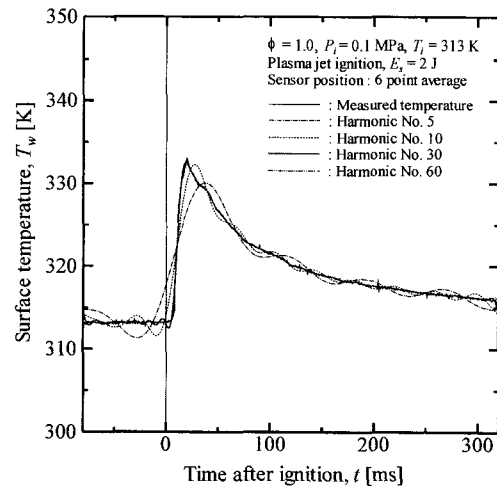


Fig. 7 Fourier approximation of combustion vessel wall surface temperature with variation of harmonic number

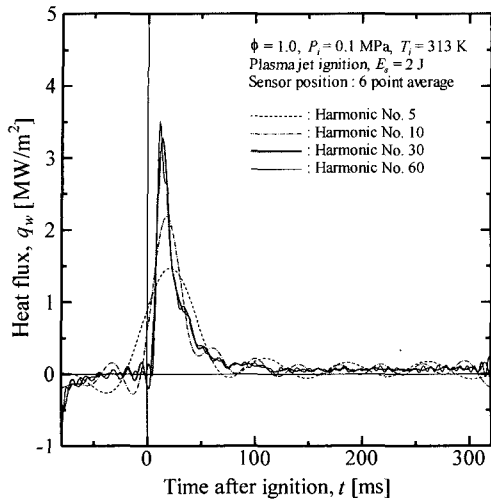


Fig. 8 Surface heat flux with variation of harmonic number

만 공급열량을 기준으로 산출한 화염전파중의 열손실 증가량은 1.5% 미만으로 나타나고, 하모닉수가 증가함에 따라 계산 처리시간이 길어지는 점을 고려하여 본 연구의 모든 열유속값의 계산은 하모닉수 30을 기준으로 처리하였다.

3.3 열유속 센서의 검정 및 보정

3.3.1 필요성

실제기관의 벽표면 온도값으로부터 열유속을 계산하는 식 (3)을 정적연소기내에서의 열유속계산에 적용할 경우 고려해야 할 사항은 첫째로, 실제기관에서의 벽표면온도는 주기적인 거동을 나타내고 있는 반면 정적연소기 실험에 있어서는 측정된 벽면 온도값이 주기성을 나타내지 않는다는 것이다. 따라서 정적연소기의 경우 측정된 벽표면 온도를 푸리에 근사법으로 연속함수를 구할 때 고려해야 하는 주기는 데이터의 측정기간으로 정의된다. 하지만 측정기간의 범위에 따라 평균 표면온도값 $T_w(0)$ 가 변하게 되어 식 (3)으로 계산 되어지는 열유속값에 제로 오프셋 오차(zero-offset error)가 발생한다. 두 번째로 고려해야 할 사항은 열유속 절대값에 대한 것으로서 측정된 온도값으로부터 구해지는 열유속값은 식 (3)에서 알 수 있는 바와 같이 전적으로 측정된 온도진폭(temperature swing)에 의존하기 때문에¹¹⁾ 순간 열유속 센서의 표면접점에서 측정되는 온도값의 정확성은 매우 중요하다 할 수 있다. 하지

만 이 온도값은 니켈도금, 열전대, 세라믹으로 이루어진 표면접점 근방의 열확산계수 값의 영향을 받는다. 센서의 구조적인 형상에 따라 표면접점에서의 열확산계수는 센서 몸체재질의 열확산계수와는 다른 값을 갖게 되지만 그 값을 정확하게 구한다는 것은 쉽지 않은 과제이며 이로 인해 측정된 순간표면온도값에 오차성분이 포함되어 이로부터 계산된 열유속 절대값은 스케일 오차(scale error)를 갖게 된다.

본 연구에서 연료에 의해 공급된 발생열량중 연소기간 내에 연소실 벽면으로의 손실열량을 평가하기 위해서는 위에서 언급한 오차성분들의 보정을 통한 열유속센서의 정량화가 필수적이다.

3.3.2 검정 및 보정방법

앞에서 언급한 두 가지 요인으로부터 발생하는 오차성분은 정적열량계와 같은 개념인 정적연소기 실험에 있어서 연소기에 공급된 연료의 발열량 Q_f 가 열유속 센서로 측정된 열유속값이 0으로 충분히 수렴하는 조건하에서 구해지는 총손실열량 Q_c 과 같아야 한다는 기본적인 원리에 의해 평가되어질 수 있다. 이때 정적연소기에 공급된 연료의 발열량 Q_f 는 실제 기관에서와는 달리 연소생성물인 수증기의 응축열까지를 포함한 고위발열량(higher heating value)을 기준으로 산정되어야 한다. 이 값은 식 (4)에 보정계수를 포함한 식 (5)로 나타낸 연소실 벽면으로의 총손실열량 Q_c 과 같다고 볼 수 있다.

$$Q_f = Q_c \quad (4)$$

$$Q_c = A \int_0^{t_0} q_w^*(t) dt \quad (5)$$

여기서 t_0 는 측정된 열유속값이 0으로 충분히 수렴하는 기간으로 정하였으며 본 연구의 경우 점화 후 320ms를 취하였다. A 는 연소실내의 표면적을 나타내며 연소기 몸체를 이루는 알루미늄 합금(6061)에 비해 광학유리의 열전도율이 0.9%에 지나지 않는다는 점과 6개의 열유속 센서들이 연소기의 몸체에 위치하고 있다는 점을 고려하여 열전달 면적 A 값에 광학유리의 면적을 포함시키지 않았다. 보정계수를 포함한 열유속값 $q_w^*(t)$ 는 $C_a \cdot \{q_w(t) + C_b\}$ 로 정의하였으며 C_a 는 스케일 오차 보정계수, C_b 는 제

로 옅게 오차 보정치를 나타낸다. 데이터 취득기간 400 ms, 데이터 측정 포인트 500 개로 실험한 본 연구의 경우 식 (4)의 조건을 만족시키는 열유속센서의 보정계수 C_a 및 C_b 는 각각 $C_a = 0.9914$, $C_b = -0.07515 \text{ MW/m}^2$ 의 값을 갖는다.

3.4 연소기간 내의 열손실 산정방법

연소실 벽표면에서 측정된 공간 평균 온도값을 기준으로 연소기간 중에 손실열량 Q^* 는 다음 식으로 평가하였다.

$$Q^* = A \int_0^{t_{mp}} q_w^*(t) dt \quad (6)$$

여기서 t_{mp} 는 연소 최고 압력점을 기준으로 결정된 연소종료시점을 나타낸다. 연소최고압력점과 연소종료시점과의 관계를 밝히기 위하여 Fig. 9에 대표적으로 당량비 1.0, 스윙속도 75rad/s인 경우 상용 스파크 플러그를 사용하여 점화시킨 경우에 대한 각 시간대의 화염전파 가시화 사진 및 압력선도를 나타낸다. 화염전파 가시화 사진은 동일조건인 반복 실험마다 순간광원의 발광시기를 1ms로부터 시작하여 2ms 간격으로 지연시켜 촬영되었으며 동일 조건에서의 압력경과곡선과 비교하였다. 압력경과곡선을 살펴보면 연소최고압력이 나타나는 시점이 점화 후 18.7ms에서 나타나고 있다. 한편 이 시점에 가장 근접한 19ms의 가시화 사진을 보면 화염면 전체가 연소실 벽면에 접한다는 것을 알 수 있지만 연소최고압력 발생시점과 가시화사진으로부터 알 수 있는 연소종료시점 사이의 관계를 명확하게 밝히기

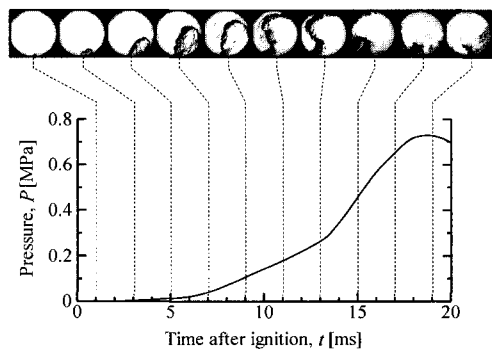


Fig. 9 Flame visualization photographs on each time and pressure rise curve for SP at $\phi = 1.0$, $N_s = 75 \text{ rad/s}$

위해서는 좀 더 세밀한 실험이 요구된다. 그러나 압력경과곡선에서 연소최고압력이 나타나는 시점과 가시화사진에서 얻어진 연소종료시점의 시간적 차이는 미미할 것으로 판단되므로 압력경과곡선에서의 연소최고압력 도달시점을 연소종료시점으로 간주하여도 무리가 없을 것이다.¹²⁾ 따라서 Fig. 10에 나타난 바와 같이 플라즈마 제트 점화에 의한 연소기간중의 손실열량 Q_{PJ}^* 와 상용 스파크 점화에 의한 연소기간중의 손실열량 Q_{SP}^* 를 결정하였다.

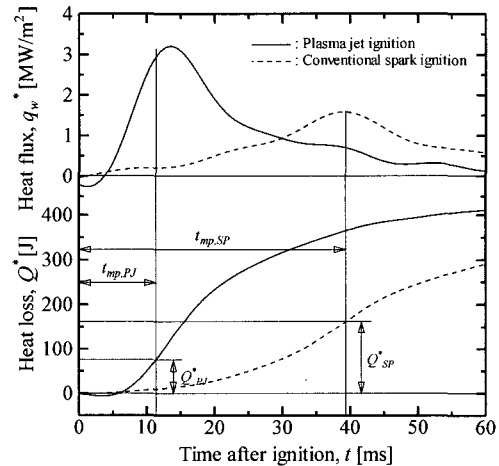


Fig. 10 Heat flux and heat loss of plasma jet and conventional spark ignition as a function of time after ignition

4. 실험결과 및 고찰

이상과 같이 정의된 열손실 평가 방법을 사용하여 정적 연소기 내에서의 플라즈마 제트 점화와 상용 스파크 점화에 의한 연소기간중의 열손실 특성을 다음과 같이 파악하였다.

4.1 열손실율

연소기간중의 손실열량은 열손실율(heat loss rate)을 다음과 같이 정의하여 이를 기준으로 평가하였다.

$$\text{heat loss rate} = Q^* / Q_f \quad (7)$$

여기서 Q_f 는 연소기 내로 공급된 연료의 총 발생 열량이며 Q^* 는 연소기간 중에 연소실 벽면으로 손실열량을 의미한다. 스윙속도 변화 및 당량비 변화

에 따른 열손실율의 거동을 Fig. 11에 나타내었으며 그림에서 보는 바와 같이 플라즈마 제트 점화 및 상용 스파크 점화의 두 경우 모두 당량비가 1.0에서 0.7로 감소함에 따라 열손실율이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 한편 스윙속도가 증가함에 따라 열손실율은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 대표적으로 당량비 1.0, 스윙속도 0rad/s인 경우에 대한 열손실율은 플라즈마제트 점화의 경우 19.5%, 상용스파크 점화의 경우 33.6%로 나타났으며 당량비 0.7, 스윙속도 0rad/s일 때 상용스파크 점화의 경우가 40.7%로 가장 높은 열손실율을 나타냈다. 또한 플라즈마 제트 점화의 경우가 상용 스파크 점화에 비해 전체적으로 낮은 열손실율을 나타내고 있으며 두 경우의 열손실율의 차이는 당량비가 감소함에 따라 좁혀지는 것을 알 수 있다.

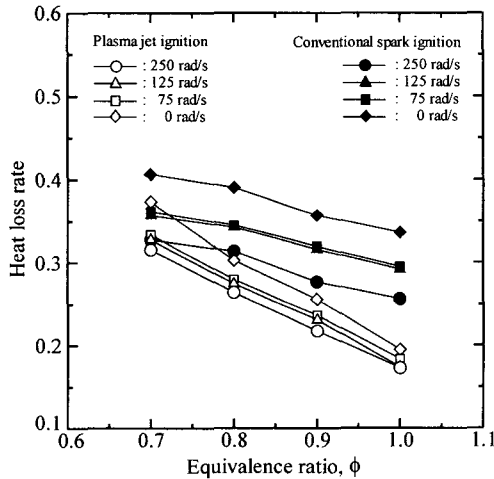


Fig. 11 Heat loss rate of plasma jet ignition and conventional spark ignition as a function of equivalence ratio

4.2 연소촉진율

플라즈마 제트 점화의 연소촉진 효과를 종합적으로 평가하기 위한 지표의 하나로서 연소시간에 근거한 연소촉진율(CER, combustion enhancement rate)²⁾을 도입하여 스윙유동장에서의 연소촉진효과를 평가하였다. 정적연소기내 연소 종료시간이 최대압력 도달시간과 일치한다고 간주하면, 총류상태 즉 스윙이 없을 때의 상용스파크 점화(SP)를 기준으로 하여 난류 유동장내의 다른 점화방법에 대한 CER은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$CER = 1 - t_{mp,r} / t_{mp,sp,i} \tag{8}$$

여기서 $t_{mp,r}$ 는 난류유동장에서의 점화 후 최고압력 도달시간을 나타내고, $t_{mp,sp,i}$ 는 유동이 없는 상태에서 상용 스파크 플러그 점화에 의한 최대압력 도달시간을 나타낸다. Fig. 12는 당량비 변화에 따른 연소촉진율을 스윙속도 변화에 대하여 나타낸 것이다. 당량비와 스윙속도가 증가함에 따라 연소촉진율은 모두 증가하고 있으며, 한편 플라즈마 제트 점화는 상용 스파크 점화에 비해 연소촉진율이 높게 나타나고 있다. 이는 열손실율의 경향과는 상반되는 결과로 열손실율의 증가는 연소촉진율을 감소시키게 될 것이다.

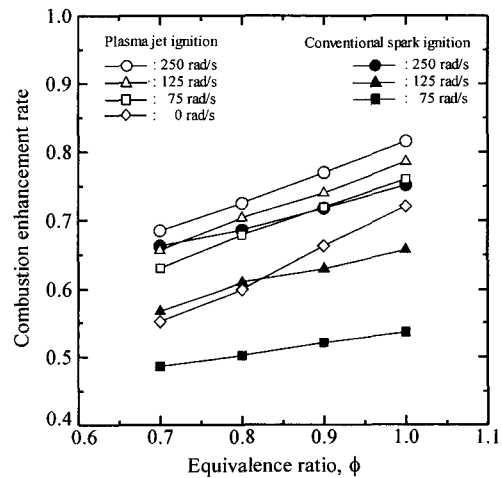


Fig. 12 Combustion enhancement rate of plasma jet ignition and conventional spark ignition as a function of equivalence ratio

5. 결 론

1) 정적연소실 내에서의 열손실을 산정함에 있어 측정된 연소실 벽표면의 순간온도로부터 계산된 열유속값이 0으로 충분히 수렴하는 조건하에서 연소기에 공급된 연료의 발열량 Q_f 와 열유속 센서로 측정된 값으로부터 구해지는 총손실열량 Q_l 이 같아질 때에 열유속 센서에 대한 정확도가 검증된다. 본 연구에서는 식 (5)와 같이 정의한 방법을 통해 순간열유속 센서의 보정을 행하였으며 보정계수는 각각 $C_a=0.9914$, $C_b=-0.07515 \text{ MW/m}^2$ 값을 갖는다.

2) 열유속 센서의 보정을 통해 정량적으로 신뢰성을 갖는 연소기간 중의 손실열량을 얻을 수 있었으며 플라즈마 제트 점화 및 상용 스파크 점화의 두 경우 모두 당량비가 1.0에서 0.7로 감소함에 따라 열손실이 증가하고, 스윙속도가 증가함에 따라 열손실은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 플라즈마 제트 점화의 경우가 상용 스파크 점화에 비해 전체적으로 낮은 열손실을 나타내고 있다.

3) 연소실 내로 공급된 연료의 발생열량에 대한 연소기간 중의 손실열량은 식 (7)로 정의된 열손실율로서 평가하였다. 당량비 1.0, 스윙속도 0rad/s인 경우에 대한 열손실율은 플라즈마제트 점화의 경우 19.5%, 상용스파크 점화의 경우 33.6%로 나타났으며 당량비 0.7, 스윙속도 0rad/s일 때 상용스파크 점화의 경우가 40.7%로 가장 높은 열손실율을 나타냈다.

4) 당량비와 스윙속도가 증가함에 따라 연소축진율은 증가하고 있으며, 플라즈마 제트 점화는 상용 스파크 점화에 비해 연소축진율이 높게 나타나고 있다. 따라서 열손실율의 증가는 연소축진율을 감소시키는 결과를 초래한다.

References

- 1) P. M. Boston, D. Bradley, F. K-K. Lung, I. M. Vince, F. J. Weinberg, "Flame Initiation in Lean, Quiescent and Turbulent Mixture with Various Igniters," Twentieth Symposium (International) On Combustion / The Combustion Institute, pp.141-149, 1984.
- 2) D. N. Rao Mittinti, E. Dabora, "Plasma Jet Ignition Studies," Twentieth Symposium (International) On Combustion / The Combustion Institute, pp.169-177, 1984.
- 3) S. J. Lee, D. H. Han, M. H. Kim, J. T. Lee, S. Y. Lee, "Heat Loss to Combustion Chamber Wall During Laminar Flame Propagation," KSME, Vol.16, No.7, pp.1398-1407, 1992.
- 4) M. H. Kim, H. Yoo, B. J. Oh, J. S. Park, "Effect of the Configuration of Plasma Jet Plug on Combustion Characteristics in a Constant Volume Vessel," KSME, Vol.23, No.5, pp. 593-602, 1999.
- 5) B. J. Oh, J. S. Park, M. H. Kim, "A Development of Plasma Jet to Realize Ultra Lean Burn," Transactions of KSAE, Vol.6, No.1, pp.213-221, 1998.
- 6) M. H. Kim, J. S. Park, J. H. Lee, "Combustion Characteristics of Plasma Jet Ignition for Different Swirl Velocity in a Constant Volume Vessel," Transactions of KSAE, Vol.9, No.2, pp.75-83, 2001.
- 7) J. S. Park, M. H. Kim, J. T. Lee, S. Y. Lee, "A Study on Heat Flux of Combustion Chamber Wall in a High Compression Ratio Methanol Engine," Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting '93, pp.35-38, 1993.
- 8) W. J. D. Annand, "Heat Transfer in the Cylinders of Reciprocating Internal Combustion Engines," Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol.177, No.36, pp.973-990, 1963.
- 9) V. D. Overbye, J. E. Bennethum, O. A. Uyehara, P. S. Myers, "Unsteady Heat Transfer in Engines," SAE Transaction, Vol.69, pp. 461-494, 1961.
- 10) F. P. Incropera, D. P. DeWitt., Fundamentals of Heat Mass Transfer - 3rd ed., John Wiley & Sons, pp.53-62, 1990.
- 11) G. F. Hohenberg, "Advanced Approaches for Heat Transfer Calculations," SAE 790825, pp. 2788-2806, 1979.
- 12) J. S. Park, "Effects of Swirl Velocity and Chamber Configuration on the Characteristics of Combustion Ignited by Plasma Jets," Ph.D Thesis, Dept. Mech. Eng. Soongsil Univ., pp. 56-57, 2002.