

열량 탐침법을 이용한 열플라즈마의 온도와 속도측정

김주찬 · 박동화

인하대학교 공과대학 화학공학과
(1991년 12월 23일 접수, 1992년 9월 7일 채택)

The Measurements of Thermal Plasma Temperature and Velocity by a Calorimetric Probe

Joo-Chan Kim and Dong-Wha Park

Dept. of Chemical Engineering, College of Engineering, Inha University
(Received 23 December 1991; accepted 7 September 1992)

요 약

경제적인 측정장치로 플라즈마류의 온도와 속도를 측정하는 방법을 제시하는 것이 본 연구의 목적이다. 플라즈마 원으로서의 아르곤 가스를 사용하여, 양극 노즐을 통해 대기로 나오는 플라즈마의 온도와 속도를 측정하였다. 플라즈마의 온도는 수냉 프로브를 이용한 열량적 측정 방법을 사용하여 플라즈마로부터 프로브 관 내를 통과하는 물에 전달된 열량을 측정하여 구했으며, 플라즈마 속도 또한 동일한 프로브를 사용하여 동압을 측정하여 구하였다. 이와 같은 실험 조작을 플라즈마류의 각 측정 단면에서 행하여 측 방향 및 반경 방향에 대한 온도 분포와 속도 분포를 구하였다. 측정된 엔탈피와 속도 분포는 질량과 에너지 수지로 검토하여 측정결과의 유효성을 확인할 수 있었으며, 실제 유입량과 실험결과를 적분하여 구한 양이 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

Abstract—The purpose of this study is to suggest a measuring technique of plasma jet temperature and velocity using an relatively economic apparatus. Argon gas was used as a plasma source. Temperature and velocity of the plasma discharged into air through the anode nozzle was measured. Plasma temperature was obtained by measuring enthalpy which was transferred from plasma to water in a water-cooled probe. The plasma velocity was obtained by measuring the dynamic pressure of the plasma by using the same water-cooled probe. Axial and radial distributions of temperature and velocity were also obtained. The validity of the measured enthalpy and velocity profiles has been confirmed by performing mass and energy balances, which show reasonable agreements between the quantities used and those obtained by integrating over the experimental data.

1. 서 론

플라즈마 공정에 관한 연구는 처음에는 전자공학 관련 연구가 대부분이었으나, 최근에는 소재분야, 가공산업분야를 구별하지 않고 플라즈마 응용연구가 활발히 행하여지고 있다. 플라즈마를 이용하여 직접 물질을 처리

또는 생성하는 플라즈마 공정 중 열플라즈마의 특징인 고온 및 고활성을 이용한 예로서는, plasma melting, plasma purification, plasma synthesis 등에 의한 고품질의 특수소재의 제조, 금속증발과 응축에 의한 화합물의 초미립자와 amorphous의 제조, 그리고 고융점 재료(ceramic)의 플라즈마 용사(plasma spray coating)

등을 들 수 있다. 이와 같은 응용에 중 용사(spray coating)의 경우, 처리물질인 입자의 표면은 증발되지 않고 입자의 중심까지 완전히 용융된 상태가 좋은 코팅을 위하여 요구된다. 즉 열플라즈마로부터 입자에 목적에 따라 열을 전달하는 것이 중요하다. 따라서 열플라즈마로부터 입자에 어느정도의 열이 이동하는가를 알기 위하여서는 플라즈마와 처리물질간에 열전달 메커니즘에 대한 확실한 규명이 요구되며 근본적으로 플라즈마의 온도와 속도를 알아야만 한다.

플라즈마의 온도 측정 기술로는 (1) 광학적 계측 방법(Laser 간섭법 및 분광학적 방법[1], 2) 열량 계측 방법[2-5], 3) 전기, 자기적 계측 방법[6]을 들 수 있다. 이 중 일반적으로 계측 결과의 정도와 신뢰도가 좋은 것으로 알려져 있는 방법은 분광학적 방법에 의한 측정이라 할 수 있으나, 이 방법은 고도의 지식과 기술이 요구되며 또한 측정 장비가 매우 고가인 단점을 가지고 있다. 한편, 열량계측 방법은 Grey[2]에 의해 소개된 이후 점차 장치의 개량으로 보다 더 정밀한 측정이 가능하게 되었고 측정결과와 신뢰성도 확인된 바 있다. 즉 Grey에 의하면 열량계측 방법은 5000-12000 K의 범위에서 10%의 오차를 갖는다고 보고되었으며, Pfender[5]에 의하면 수치적으로 구한 값과 5% 이내의 오차를 갖는다고 보고되었다.

이에 본 연구는 물이 통과하는 3중관 수냉 열량프로브를 사용하여 플라즈마로부터 프로브 내의 물에 전달된 열량을 측정하여 플라즈마 온도를 구하는 방법으로서 저렴한 기본장비와 열전달 공학의 지식을 이용하여 경제적인 측정이 가능하다. 따라서 기초적인 열전달공학의 지식을 이용하고 경제적인 장치를 사용하여 플라즈마 온도와 속도의 측정방법을 개발하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 실험

본 실험에서 사용한 열플라즈마 발생 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 열플라즈마 원료 가스로서는 아르곤을 사용하였으며, 음극과 양극사이에서 arc 방전에 의해 플라즈마가 발생된다. 여기서 사용한 음극은 직경 6 mm의 텅스텐 봉이며, 양극로서는 내경 8 mm의銅 노즐을 사용하였다. 발생장치 전체는 열로부터 보호하기 위해 양 전극을 수냉시키도록 제작하였다.

2-1. 열플라즈마 온도 및 속도 측정 장치

노즐을 통해 대기로 분출된 아르곤 플라즈마의 온도와 속도를 노즐 출구로부터 측 방향, 반경 방향으로의 각 지점에서 3중관 수냉 프로브를 사용하여 측정하였다.

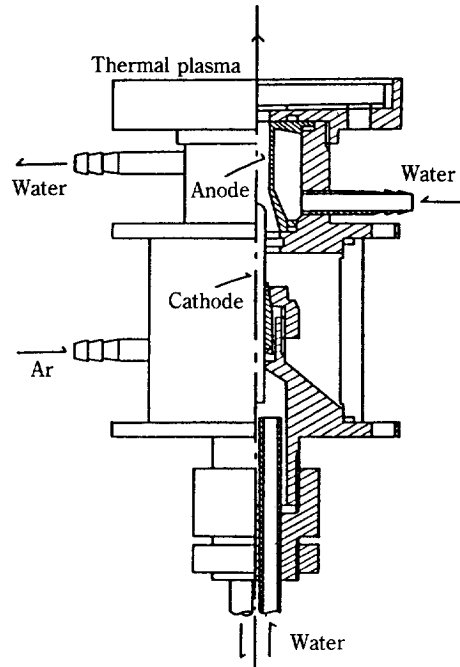


Fig. 1. Thermal plasma generator.

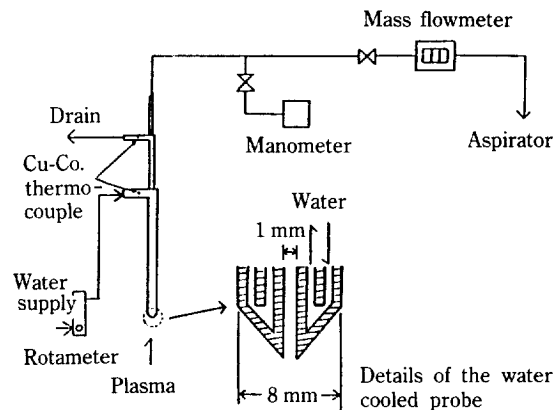


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus.

실험장치에 관한 개략도 및 3중관 수냉 프로브의 상세도를 Fig. 2에 나타내었다. 이 프로브는銅으로 제작된 것으로서 외경 8 mm, 내경 1 mm이고, 외경의 2중관은 물의 출입에 이용되고, 내관은 aspirator에 의해 플라즈마가 흡입되도록 되어 있다. 실험장치는 플라즈마 발생부, 3중 수냉 프로브 및 그외 주변 측정 장치(유량계, 아르곤 mass flowmeter, 물 마노미터)로 구성되어 있다.

2-2. 열플라즈마 온도 및 속도 측정 방법

온도 측정은 우선 mass flowmeter로 플라즈마 유량을 체크하면서 플라즈마가스를 aspirator로 흡입하는 경우와 플라즈마 가스를 흘리지 않는 경우에 대하여 냉각수의 출입구에 부착된 Cu-Co 열전대로 냉각수의 입구와 출구에서의 온도차의 차를 구한다. 또한 냉각수가 얻은 엔탈피를 산출하기 위하여 냉각수의 유량을 유량계를 사용하여 구한다.

프로브 내에 들어가는 플라즈마의 단위질량당의 엔탈피를 H_1 , 프로브 내의 냉각수에 의해 온도가 충분히 낮아진 후 프로브 내로부터 나올 때의 엔탈피를 H_2 , 플라즈마를 프로브속으로 흘렸을 때와 흘리지 않았을 때의 입구와 출구에서의 물의 온도차의 차를 ΔT , 물의 질량유속을 m_w , 프로브에 들어오는 아르곤 플라즈마의 질량유속을 m_{Ar} , 물의 비열을 C_{pw} 라 하고, 플라즈마가 갖고 있는 에너지가 프로브를 통과하는 물에 전부 전달되었다고 가정하면, 이 때 플라즈마류와 프로브를 통과하는 물 사이의 에너지 수지식은

$$(H_1 - H_2) m_{Ar} = m_w C_{pw} \Delta T \quad (1)$$

가 된다. 이 경우 고온의 플라즈마의 단위질량당의 엔탈피 H_1 에 비해서 상온까지 냉각된 가스가 갖고 있는 엔탈피 H_2 는 무시할 수 있다. 따라서 플라즈마가 갖고 있는 엔탈피는 전부 물에 전달한 것이 되어

$$H_1 = \frac{m_w C_{pw} \Delta T}{m_{Ar}} \quad (2)$$

가 된다. 이 엔탈피를 이용하여 다음과 같은 엔탈피와 온도와의 관계식[7]을 가지고 플라즈마 온도를 구한다.

$$H = -3.333 \times 10^2 + 5.2046 \times 10^2 T \quad (T < 6,000 \text{ K}) \quad (3)$$

$$H = -2.7261 \times 10^7 + 1.1732 \times 10^4 T - 1.5176 T^2 + 6.775 \times 10^{-5} T^3 \quad (6,000 \text{ K} < T < 15,000 \text{ K}) \quad (4)$$

$$H = -8.8305 \times 10^8 + 1.4067 \times 10^5 T - 7.1435 T^2 + 1.233 \times 10^{-4} T^3 \quad (T > 15,000 \text{ K}) \quad (5)$$

플라즈마 속도는 플라즈마를 3중관 프로브속으로 흘리지 않았을 때 측정하므로, 이 때의 프로브는 pitot tube의 역할을 하게 된다. 속도 측정은 온도 측정을 행한 위치와 동일한 측정 단면에 3중관 프로브를 setting한 후, mass flow meter측의 밸브를 닫고, 마노미터측의 밸브를 열어서 대기압과의 압력차를 물 마노미터로 측정하여 동압을 구한다. 플라즈마 속도 u 는 측정된 ΔP 를 사용하여 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$u = \left(\frac{2g\Delta P}{\rho} \right)^{1/2} \quad (6)$$

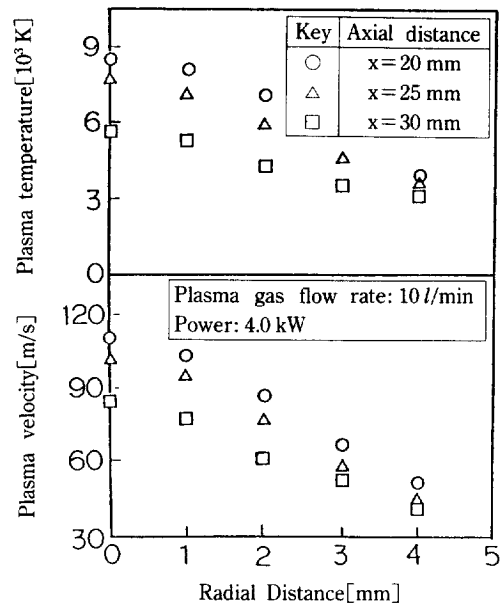


Fig. 3. Radial distribution of measured plasma temperature and velocity at 20, 25 and 30 mm downstream from the exit of anode nozzle.

식 (6)의 밀도(ρ)는 앞에서 구한 온도 T 로부터 다음과 같은 밀도와 온도와의 관계식[7]을 이용하여 구한다.

$$\rho = -6.0953 \times 10^{-3} + 4.8509 \times 10^2 (1/T) + 1.863 \times 10^{-6} T - 1.468 \times 10^{-10} T^2 \quad (T < 13,000 \text{ K}) \quad (7)$$

$$\rho = -4.1702 \times 10^{-1} + 3.1021 \times 10^3 (1/T) + 2.0334 \times 10^{-5} T - 3.3198 \times 10^{-10} T^2 \quad (T > 13,000 \text{ K}) \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 반경 방향 및 축 방향에 대한 플라즈마 온도 및 속도 분포

플라즈마 가스 유량이 10 l/min이며, power가 4.0 kW 일 때 양극 노즐 출구($x=0$ 으로 나타냄)로부터 20, 25, 30 mm 떨어진 지점에서 반경 방향에 대한 플라즈마 온도와 속도 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 사용한 변수 x 는 양극 노즐 출구로부터 거리를 나타낸다. 온도 분포는 반경 방향으로 포물선 분포에 가까운 형태를 나타내고 있으며, 또한 노즐 출구로부터 멀어질수록 온도가 낮아지는 것을 알았다. 양극 노즐 출구로부터 20 mm 떨어진 지점에서 중심 축선상의 온도는 약 8400 K, 30 mm 떨어진 지점에서 중심 축선상의 온도는 약 5600 K이며, 또한 반경거리 4 mm의 양극 노즐 출구로

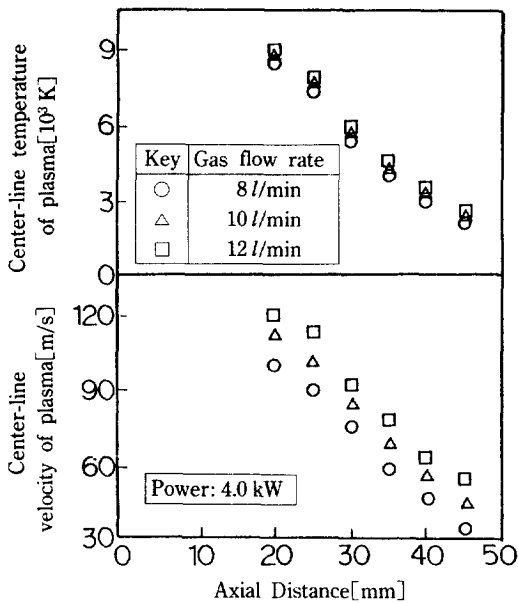


Fig. 4. Axial distribution of center-line temperature and velocity of plasma.

부터 20 mm인 지점에서의 온도는 4300 K 정도이다. 속도 분포는 온도 분포와 마찬가지로 반경 방향으로 포물선분포에 가까운 형태이었고, 노즐 출구에 가까울수록 플라스마 속도가 증가함을 알 수 있다. 20 mm 떨어진 지점에서 중심 축선상의 속도는 약 110 m/s를 나타내었다.

Fig 4는 축 방향에 대한 중심 축선상의 플라스마 온도와 속도 변화를 나타낸 것이다. 4.0 kW 하에서 3종류 플라스마 가스 유량(8, 10, 12 l/min)을 사용하여 실험한 결과, 축 방향에 대하여 온도가 급격히 감소하여 $x=45$ mm에서는 약 2300 K을 나타내었다. 여기서 노즐 출구로부터 20 mm 이내 지점에서는 실험적 제한성 때문에 측정이 불가능하였다. 플라스마 속도 변화는 온도 변화와 비슷한 경향을 나타내며 노즐 출구에서 멀어질수록 급격히 속도가 감소($x=45$ mm에서 44 m/s)함을 알 수 있다.

3-2. 플라스마 가스 유량 및 power 변화에 따른 플라스마 온도 및 속도 변화

플라스마 전력 4.0 kW의 조건에서 플라스마 가스 유량 변화에 따른 플라스마 온도와 속도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 사용한 변수는 양극 노즐 출구로부터 20, 25, 30, 35 mm 떨어진 지점에서 측정한 것이다. 유량이 8 l/min에서 12 l/min으로 증가함에 따라 플라스마 온도가 증가하고, 노즐 출구에 가까울수록 온도가

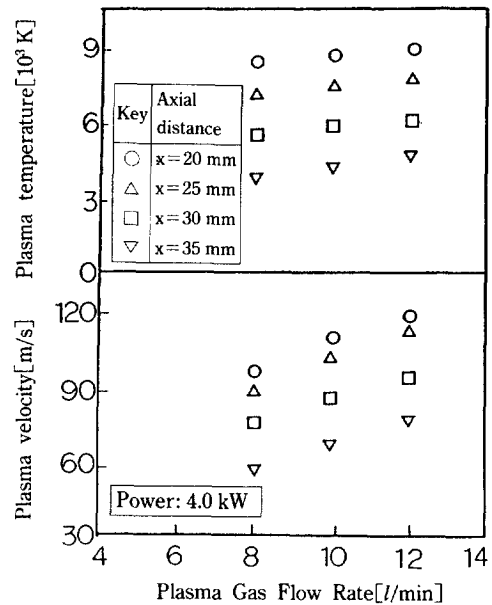


Fig. 5. Variation of measured plasma temperature and velocity with plasma gas flow rate.

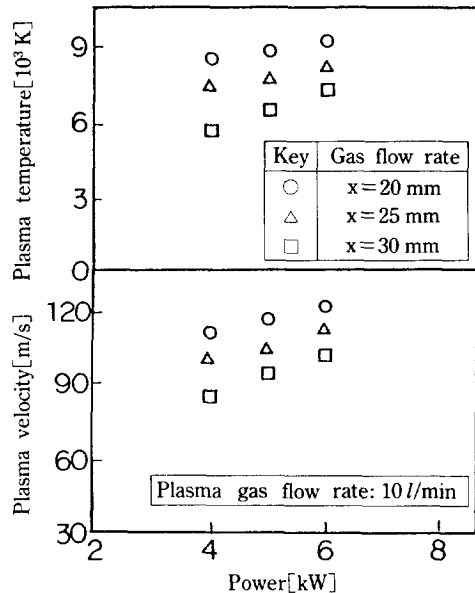


Fig. 6. Variation of measured plasma temperature and velocity with power.

높음을 알 수 있다. 플라스마 속도는 온도의 변화에서와 마찬가지로 유량의 증가에 따라 속도가 증가하였다. 이는 플라스마 가스 유량이 증가한 것과 또한 유량의 증가에 따라 온도가 증가함으로써 밀도가 감소하며, 질량보존의

법칙($m=\rho uA$)에 의해 속도가 증가한 것으로 설명할 수 있다.

Fig. 6은 전력 변화에 따른 온도와 속도 변화의 측정 결과이다. 플라즈마 가스 유량이 10 l/min의 조건에서, 전력이 4.0 kW에서 6.0 kW로 증가함에 따라 온도가 증가하였으며, 노즐 출구에 가까울수록 온도가 높아짐을 알 수 있다. 온도 변화와 마찬가지로 전력이 증가함에 따라 속도가 증가하였다. 이는 전력이 증가함으로써 온도가 높아졌으므로, 이에 따른 밀도의 감소로 인해 속도가 증가한 것으로 설명할 수 있다.

3-3. 질량 및 에너지 수지를 이용한 실험data검토

본 3중관 수냉 프로브를 이용한 측정 결과의 유효성을 확인하기 위하여 측정 data를 사용하여 질량과 에너지 수지를 구함으로써 측정 결과의 신뢰성을 검토하였다.

질량 수지를 이용한 검토는 플라즈마를 발생하기 위해 유입된 아르곤의 질량유량과 플라즈마 노즐을 통해 나온 질량유량이 같다는 가정을 사용하였다. 즉 플라즈마 노즐을 통해 나온 질량유량은, $M_{Ar} = \rho \cdot U \cdot A$ 의 관계로부터 $M_{Ar} = \rho \cdot U \cdot \pi r^2$ 이 되고, 이 식을 반경에 대해 미분한 후 적분하면

$$M_{Ar} = 2\pi \int \rho \cdot u \cdot r \, dr \quad (9)$$

가 된다. 이 때 플라즈마 흐름은 노즐 출구를 통해 밖으로 나오므로 축대칭으로 가정하였다. 따라서 플라즈마 흐름의 단면에서 측정된 플라즈마의 온도와 속도를 식 (9)에 대입하여 실제 플라즈마 발생에 사용된 아르곤의 질량유량과 비교하였다. 식 (9)의 밀도는 온도의 함수이므로 측정된 플라즈마 온도에 대한 값을 사용하였다.

또한 에너지 수지를 이용하여 같은 방법으로 검토하였다. 즉 양극 노즐 출구로부터 나오는 플라즈마가 갖고 있는 에너지(P_n)와 실험으로부터 얻은 플라즈마의 온도와 속도 값을 사용하여 구한 에너지(Q_r)를 비교하였다. 측정치를 사용하여 구한 에너지(Q_r)는

$$Q_r = 2\pi \int \rho \cdot u \cdot H \cdot r \, dr \quad (10)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 한편 P_n 은 플라즈마를 발생시키기 위하여 공급된 에너지에서 양 전극의 수냉용으로 사용한 물에 의하여 손실된 에너지를 뺀 값을 나타낸다. 즉, 플라즈마를 발생시키기 위하여 공급된 에너지는 전원(power supply)에 부착된 전류계와 전압계로 측정하였으며 양 전극에서 물에 의해 손실된 에너지는 발생 장치의 냉각수 입구와 출구에 부착된 Cu-Co열전대를 이용하여 출입구에서의 온도 차이를 구하고, 유량계로 냉각수 유량을 측정함으로써 구할 수 있다. 이 때

Table 1. Results of mass and energy balance(Power: 4.0 kW, x=20 mm)

Plasma gas flow rate [l/min]	Mass balance	Energy balance
	Integrated probe mass flow rate($=2\pi \int \rho u r dr$) Input plasma gas flow rate	Integrated probe energy ($=2\pi \int \rho u H r dr$) Input Energy loss in Electrodes
8	1.10	0.98
10	1.08	1.10
12	1.07	1.20

여기서의 물의 비열은 상온에서의 값을 사용하였다.

플라즈마 가스 유량 변화에 대하여 질량 수지와 에너지 수지로 검토한 결과를 Table 1에 나타내었다. 실제 실험에 사용한 가스의 질량과 측정된 온도 및 속도로부터 적분하여 구한 가스의 질량이 비슷함을 확인하였다. 또한 노즐 출구로부터 나오는 플라즈마가 갖고 있는 에너지와 측정된 온도 및 속도로부터 적분하여 구한 에너지도 비교적 일치함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

이상과 같은 실험결과에 의하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 반경 방향에 대하여 플라즈마의 온도와 속도 분포는 포물선 분포에 가까운 형태를 나타내었다.
- (2) 축 방향에 대하여 플라즈마의 온도와 속도 변화는 축 방향에 따라 급격히 감소하였다.
- (3) 플라즈마 가스 유량의 증가에 따라 플라즈마 온도와 속도가 증가하였다.
- (4) 플라즈마 유입 전력의 증가에 따라 플라즈마 온도와 속도가 증가하였다.
- (5) 질량 수지, 에너지 수지로 검토한 결과 비교적 잘 일치하였다.

이와 같은 실험결과에 의하여 프로브를 사용한 실험에 있어서 다음과 같은 제안을 할 수 있다. 본 실험에 사용한 열량계측 프로브(calorimetric probe)의 장점으로는 측정이 비교적 쉽고 편리하며, 실험장치의 경제성과 비교적 높은 정확성을 들 수 있으며 단점으로는 flow와 no flow에서 프로브 팁 주위의 흐름 상태를 똑같이 만드는데 어려움이 있다는 것이다. 그러나 계속적인 디자인의 개발과 더 작은 프로브를 사용하여 측정함으로써 이러한 단점을 보완할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사

본 연구는 한국학술진흥재단(91년도, 자유공모과제) 연구비지원에 의해서 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

사용기호

C_{pw}	: specific heat at constant pressure [J/kg·K]
g	: conversion factor [$m \cdot kg/s^2 \cdot N$]
H	: specific enthalpy of plasma [J/kg]
H_1	: specific enthalpy of plasma at the probe inlet [J/kg]
H_2	: specific enthalpy of gas at the probe outlet [J/kg]
M_{Ar}	: mass flow rate of argon carried by the jet [kg/s]
m_{Ar}	: mass flow rate of Ar plasma gas through the probe [kg/s]
m_w	: mass flow rate of water in probe [kg/s]
P_n	: net power [W]
Q_j	: energy carried by the jet [W]
r	: radial coordinate [mm]
r_o	: limit of integration [mm]
ΔT	: temperature difference between flow and no flow [K]

ΔP	: dynamic pressure [N/m ²]
x	: distance from the nozzle [mm]

그리스문자

ρ	: mass density [kg/m ³]
--------	-------------------------------------

하첨자

Ar	: argon gas
w	: water

참고문헌

1. Mehmetoglu, M. T., Kitzinger, F. and Gauvin, W. H.: *Rev. Sci. Instr.*, **53**, 285(1982).
2. Grey, J., Jacobs, P. F. and Sherman, M. P.: *Rev. Sci. Instr.*, **33**, 738(1962).
3. 神澤 淳: 化學工學(日), **36**(9), 1004(1972).
4. Kata, S., Lewis, J. A. and Gauvin, W. H.: *Rev. Sci. Instr.*, **44**, 1519(1973).
5. Capetti, A. and Pfender, E.: *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, **9**, 329(1989).
6. Grey, J. and Jacobs, P. F.: *AIAA J.*, **5**, 84(1967).
7. Chen, Xi, Chyou, Y. P., Lee, Y. C. and Pfender, E.: *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, **5**, 119 (1984).