

技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.12.1240

아크 플라즈마 유동에 삽입된 엔탈피 탐침의 동작특성 실험

서준호*, 남준석**, 최성만***, 홍봉근*, 홍상희**

Experimental analysis on the characteristics of enthalpy probe immersed in arc plasma flow

Jun-Ho Seo*, Jun-Seok Nam**, Seong-Man Choi***, Bong-Gun Hong* and Sang-Hee Hong**

ABSTRACT

Enthalpy probe with the inner and outer diameters of 1.5 mm and 4.8 mm, respectively, is designed and used to measure the temperatures and velocities along the centerline of Ar arc plasma flow until the probe was destroyed. For this purpose, Ar arc plasma flow is generated by non-transferred type DC arc heater with the power level of 17 kW. From this experiment, it is shown that the designed enthalpy probe can measure the temperature and velocity of arc plasma flow up to 12,000 K and 600 m/s, respectively, without destroy of probe tip. In this extreme case, the arc plasma flow is calculated to transfer the heat flux of $\sim 5 \times 10^7$ W/m² to the probe based on the heat and thermal boundary equations near the forward stagnation point of a body immersed in arc plasma flow. Consequently, the designed enthalpy probe can measure the wide ranges of plasma temperatures, velocities and concentrations simultaneously, which are generated by various types of arc heaters within the heat flux ranges of 0~ 5×10^7 W/m² on the probe tip.

초 록

내경 1.5 mm, 외경 4.8 mm를 갖는 엔탈피 탐침을 설계 제작하고, 17 kW급 비이송식 직류 아크히터로부터 나오는 고엔탈피 Ar 아크 플라즈마 유동의 중심축을 따라 삽입하면서 탐침 침두가 파괴될 때까지 온도와 속도를 측정하였다. 이 실험으로부터, 설계된 엔탈피 탐침은 대기압 조건에서 최대 12,000 K의 온도와 600 m/s의 속도를 갖는 고엔탈피 아크 플라즈마 유동장에 대해 탐침 침두의 파괴 없이 동작할 수 있음을 관찰하였다. 탐침 침두에서 형성되는 비압축성 열경계층 및 열속 방정식으로부터 이 경우의 아크 플라즈마 유동은 약 $\sim 5 \times 10^7$ W/m²의 열속 부하를 전달한 것으로 추측되었다. 이로부터, 설계된 엔탈피 탐침은 0~ 5×10^7 W/m²의 열속 범위 내에서 다양한 형태의 아크히터로부터 발생하는 넓은 범위의 플라즈마 온도, 속도 및 농도를 동시에 측정할 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words : Arc Plasma Jet(아크 플라즈마 유동), Enthalpy Probe(엔탈피 탐침), Heat Flux(열속), Arc Heater(아크 히터)

† 2010년 6월 25일 접수 ~ 2010년 11월 30일 심사완료

* 정희원, 전북대학교 고온플라즈마 응용연구센터

교신저자, E-mail : jhseo@jbnu.ac.kr

전라북도 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

** 정희원, 서울대학교 원자핵공학과

*** 정희원, 전북대학교 항공우주공학과

I. 서 론

2008년에 발표된 우주개발사업 세부실천로드맵에 따르면, 우리나라는 로드맵 마지막 단계인 2025년-2030년 사이에 달 착륙 탐사선을 보낼 계

획을 가지고 있다. 이 로드맵의 마지막 단계에서 달 착륙 탐사선이 ^3He 등 달에 풍부한 자원 샘플을 담고 무사히 지구로 귀환하기 위해서는 달-지구 전이 궤도를 따라 재진입 비행을 성공적으로 수행하여야 한다. 통상적으로 재진입 비행체는 약 11 km/s의 속도로 지구 대기 중 진입하게 되며 이 속도에서 겪는 대기 상부 공기와의 마찰 때문에 약 11,000 K 온도의 플라즈마 상태에서 형성되는 충격파를 겪으면서 감속된다. 이후, 마하 수 2 정도의 속도에 이르르면, 낙하산을 펴고 착륙을 시도하는 것이 일반적이다⁽¹⁻²⁾. 따라서, 우주개발 로드맵의 마지막 단계인 2025년까지는 지구 재진입 비행과 같은 극한 상황에서도 견딜 수 있는 열차폐체 개발이 완료되어야 하며, 이와 동시에 개발된 열차폐체 및 시스템의 지상 검증을 수행할 수 있는, 11,000 K 이상의 온도와 마하 2 이상의 속도를 가진 아크 플라즈마 유동을 만들어 낼 수 있는 지상 공력가열장치의 확보가 필수적이다. 이를 위해, 전북대학교 고온 플라즈마 응용센터 구축사업단은 최대 2.4 MW 급 아크히터 장비와 관련 부대 지원 설비를 구축 중에 있으며, 특히, 구축한 아크히터로부터 발생되는 아크 플라즈마 유동의 온도, 속도 및 엔탈피 특성을 동시에 진단하기 위해 엔탈피 탐침법의 적용 가능성을 검토하고 있다. 본 논문에서는 내경 1.5 mm, 외경 4.8 mm를 갖는 엔탈피 탐침을 설계 제작하고, 이를 17 kW급 비이송식 직류 아크히터로부터 나오는 고엔탈피 Ar 아크 플라즈마 유동에 삽입하여, 설계된 탐침이 견딜 수 있는 최대 열속 부하 조건에서 플라즈마 온도와 속도 측정 실험을 수행함으로써, 향후, 구축 예정인 2.4 MW 급 아크히터 장치의 기본 진단기법으로서의 타당성을 살펴보고자 한다. 이 실험에서 사용된 17 kW급 비이송식 직류 아크히터의 경우, 2.4 MW 아크히터와는 달리, 발생된 초고온 플라즈마 유동이 8mm 이내의 노즐 직경 범위에서만 좁게 형성된다는 단점이 있지만, 반대로 8mm 이내의 좁은 범위에서는 10,000 K 이상의 고온과 500 m/s 이상의 고온 고속 아크 플라즈마 유동 특성을 쉽게 구현해 낼 것으로 기대되므로, 이 유동장 범위에서의 엔탈피 탐침 동작원리 구현과 플라즈마 온도 및 속도장 해석에 유용하리라 생각된다.

II. 본 론

2.1 관련 이론

본 논문에서 특성해석을 수행하고자 하는 엔탈피 탐침은 Fig. 1에 보인 바와 같이, 탐침 내경을

통해 플라즈마 기체를 통과시킬 수 있는 수냉식 정압/기체포집 탐침으로서, 5,000 K 이상의 고온 플라즈마 유동 내에 삽입하여 플라즈마의 엔탈피, 온도, 속도 등을 한꺼번에 측정할 수 있도록 고안된 장치이다⁽³⁻⁶⁾. 이 중, 엔탈피 탐침을 이용한 플라즈마 엔탈피 및 온도 측정은, 탐침 내부를 통해 일정하게 포집된 플라즈마 기체가 탐침을 빠져 나가면서 겪는 엔탈피의 변화를 탐침 냉각수 온도 상승을 통해 알아냄으로써 가능하다. 플라즈마 속도의 경우, 마하 수가 작을 때, 플라즈마 불꽃에 삽입된 엔탈피 탐침을 수냉식 피토관처럼 사용하여 전압(Total pressure)을 측정하고 베르누이 방정식에 대입하여 계산해 낼 수 있다. 또한, 엔탈피 탐침의 내경을 통과하여 빠져나온 포집기체를 질량분석기 등에 연결할 경우, 플라즈마의 기체 구성비까지 함께 분석할 수 있으며⁽⁴⁻⁵⁾, 엔탈피 탐침의 침두를 제외한 겉표면을 세라믹 절연체로 코팅하고 정전 탐침 회로에 연결함으로써, 수냉식 정전탐침으로도 사용할 수 있다⁽⁶⁾. 최근에는, 마하 수가 1 이상인 초음속 아크 플라즈마 유동의 경우에 엔탈피 탐침을 이용한 온도 및 속도 측정 방법에 관한 연구가 진행되고 있다⁽⁶⁾. 엔탈피 탐침을 이용하여 포집된 아크 플라즈마 유동의 엔탈피 변화는 플라즈마 기체의 유입이 있을 경우(sampling)와 없을 경우(tare)에 각각 측정되는 냉각수 온도 상승값의 차이를 통해, 식 (1)과 같이 구할 수 있다⁽³⁾.

$$\dot{m}_g(h_i - h_e) = \dot{m}_c C_{Pc}((\Delta T_c)_s - (\Delta T_c)_t) \quad (1)$$

여기서, \dot{m}_g 및 \dot{m}_c 는 포집된 플라즈마 기체 유량과 냉각수 유량을, h_i 와 h_e 는 탐침 입구 및 출구에서의 플라즈마 엔탈피를 의미하며, 그림 1에서 (ΔT_c) 는 엔탈피 탐침 내부로 투입되어 탐침을 식히고 다시 나오는 냉각수의 온도상승을 의미하며, 식 (2)에서 $(\Delta T_c)_s$ 와 $(\Delta T_c)_t$ 는 각각 탐침 내부로 플라즈마 기체의 유입이 있을 경우(sampling)와 없을 경우(tare), 측정되는 냉각수의 온도 상승을 뜻한다. C_{Pc} 는 냉각수의 정압비열로서 냉각수 온도 또는 압력의 함수이다.

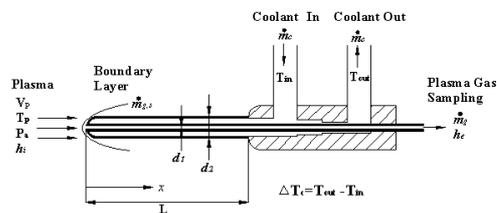


Fig. 1. A schematic of an enthalpy probe

탐침 출구에서의 엔탈피 h_e 는 입구에서의 엔탈피 h_i 에 비해 아주 작기 때문에 이를 무시하면, 플라즈마 엔탈피 h_i 는 아래 식 (2)와 같이 정리하여 표현할 수 있으며

$$h_i = \frac{\dot{m}_c}{m_g} C_{Pc} ((\Delta T_c)_s - (\Delta T_c)_t) \quad (2)$$

이를 통해 계측된 엔탈피 값, h_i 로부터, 플라즈마 온도 T_p 는 아래 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$h_i = C_{Pg}(T_p) T_p \quad (3)$$

C_{Pg} 는 플라즈마 기체의 정압비열이며 플라즈마 온도 T_p 의 함수이다. 플라즈마 속도 V_p 의 경우, 마하 수가 1보다 작다는 가정 하에, 기체 유입이 없을 때, 탐침 내부를 통해 측정되는 전압 P_t 를 식 (4)로 표현된 베르누이 방정식에 대입하여 계산할 수 있다.

$$V_p = \sqrt{\frac{2}{\rho(T_p)} (P_t - P_a)} \quad (4)$$

여기서, $\rho(T_p)$ 는 플라즈마 밀도, P_a 는 탐침 주변 플라즈마 기체의 압력을 의미한다. 또한, 본 논문에서는 실험이 상압에서 수행되었으므로, 마하 수가 상대적으로 작은 비압축성 유동일 것으로 기대할 수 있고, 이에 따라, P_a 역시 상압이라 가정하였다.

한편, Fig. 1과 같이 플라즈마 유동에 평행한 방향으로 삽입된 엔탈피 탐침의 경우, 플라즈마로부터 뚫직한 탐침 침두 표면으로 전달되는 열량 q'' 은 식 (5)와 같이 표현가능하다.

$$q'' = \frac{N_D k (T_p - T_w)}{D} \quad (5)$$

여기서, D 는 탐침 외경, N_D 와 k 는 각각 침두 경계층에서의 Nusselt 수 및 플라즈마 열전도도이다. T_p 는 앞에서의 정의대로, 경계층 바깥에서의 플라즈마 온도를, T_w 는 탐침 표면 온도를 나타낸다. 식 (5)에 대해 Sibulkin⁽⁷⁾은 뚫직한 침두를 가진 축대칭 물체가 층류, 비압축성 유동을 통과할 때, 정체점 주위에서 발달하는 경계층 내에서의 속도 및 온도분포 해석을 통해 침두 경계층에서의 Nusselt 수를 식 (6)과 같이 제안한 바 있다.

$$N_D = 1.32 Re_D^{0.5} Pr^{0.4} \quad (6)$$

위 식에서, Re_D 및 Pr 은 침두 경계층에서의 레이놀즈 수 및 프란틀 수를 의미하며 경계층 바깥에서의 플라즈마 온도 T_p 및 속도 V_p 의 함수로서 각각 식 (7) 및 식 (8)과 같이 표현된다.

$$Re_D = \frac{\rho(T_p) V_p D}{\mu(T_p)} \quad (7)$$

$$Pr = \frac{C_{Pg}(T_p) \mu(T_p)}{k(T_p)} \quad (8)$$

여기서 $\mu(T_p)$, $k(T_p)$ 는 각각 플라즈마의 점성계수 및 열전도도를 뜻한다. 식 (7),(8)을 식 (6)에 대입하고, 이를 다시, 식 (5)에 대입함으로써, 탐침 침두 부분을 통해 들어오는 단위 면적당 열량 q''_p 을 플라즈마 온도 T_p 및 속도 V_p 에 따라 계산할 수 있다. 곧, 플라즈마 온도 T_p 및 속도 V_p 가 계산되거나 측정되면, 그 때, 침두에 인가되는 열속을 위 식들을 사용하여 추정할 수 있다. 이외, 본 논문에서, 식 (3) 및 (4)의 플라즈마 온도, 속도 및 기타 계산을 위해 사용한 $C_{Pg}(T_p)$, $\rho(T_p)$, $\mu(T_p)$ 및 $k(T_p)$ 값 등은 모두 Boulos 등이 저술한 참고문헌 (8)에서 500 K - 24,000 K 범위에 대해 계산된 Ar 플라즈마의 열역학 및 수송계수 물성값을 2차 보간하여 얻은 것이다.

2.2 실험 장치의 구성

실험에 사용된 엔탈피 탐침은 Fig. 2에서 살펴볼 수 있듯이, 얇은 3개의 알루미늄 또는 스테인레스 스틸 관을 외경 4.8 mm, 내경 1.5 mm를 유지하도록 동축으로 배열한 뒤, 안쪽 관과 바깥쪽 관을 레이저 용접하여 제작하였다. 이런 식으로 제작된 엔탈피 탐침을 3개의 분할체로 구성된 알루미늄 몸체에 연결하여 각 금속관의 동축을 유지시켜주고, 금속관 사이의 틈새로 냉각수 공급이 가능하도록 하였다.

엔탈피 탐침을 구동하기 위한 엔탈피 탐침 시스템은 Fig. 3의 개략도에 나타낸 바와 같이, 엔탈피

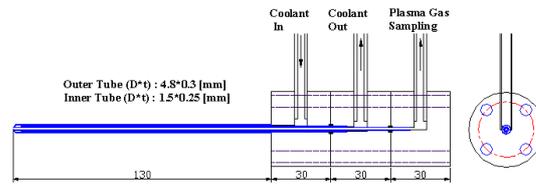


Fig. 2. The design of an enthalpy probe
(D : Outer Diameter, t : Thickness)

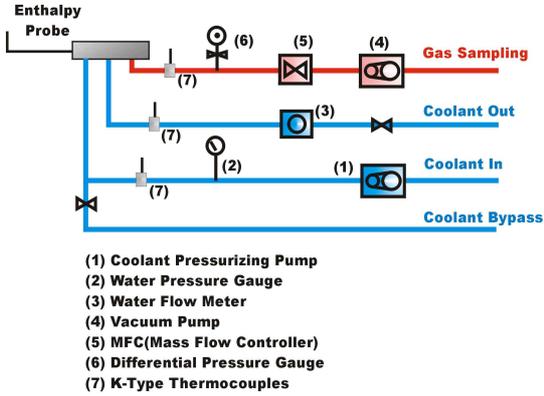


Fig. 3. Schematic view of enthalpy probe line

피 탐침을 중심으로 냉각수 공급 라인과 플라즈마 기체 포집 라인으로 구성되며, 탐침 이송장치 및 데이터 획득장치와 결합되어 플라즈마 특성 진단 실험을 수행할 수 있도록 설계되었다. 냉각수는 수돗물을 필터로 여과한 후, 최고 83 기압에서 6 lpm의 냉각수를 흘릴 수 있는 용적식 펌프를 사용하여 공급하였으며, 냉각수 유량은 오차범위 3% 이내인 터빈 유량계를 냉각수 공급라인 출구 쪽에 설치하여 측정하였다. 탐침 내부를 통과하는 플라즈마 기체 유량은 1.7%의 계측 오차 범위를 가지는 MFC(Mass Flow Controller)를 사용하여 일정하게 제어가능하도록 하였으며, MFC 동작에 필요한 압력차 유지를 위해 진공펌프를 사용하였다. 0-30 kPa 범위의 차압계 (계측 오차 범위 ± 300 Pa)를 기체 포집 라인에 설치하여 플라즈마 기체의 정압을 측정하였으며, 이를 식 (4)에 대입하여 플라즈마 속도를 계산하였다. 냉각수 온도 상승 및 엔탈피 탐침을 통과한 플라즈마 기체의 출구 온도를 측정하기 위해, 오차범위 ±0.25 °C를 갖는 K-type 열전대 3개를 사용하였으며, 열전대로부터 나오는 전압신호 획득 및 처리를 위해 SCXI와 PXI 장치를 이용하였다.

설계, 제작된 엔탈피 탐침의 동작 특성 실험 및 아크 플라즈마 유동 특성 진단 실험을 위해

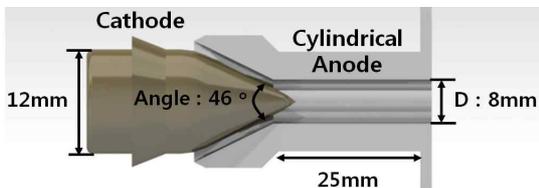


Fig. 4. Non-transferred DC arc heater with Rod-Nozzle type electrodes

Table 1. Design and operation conditions for non-transferred type DC arc heater

Input Power [kW]	17
Input Current [A]	500
Input Voltage [V]	34
Flow Rates of Plasma Gas (Ar) [slpm]	40

17 kW 급 비이송식 DC 아크히터를 사용하였으며, 실험에 사용된 비이송식 DC 아크히터는 원뿔 모양의 토름이 포함된 텅스텐 음극과 무산소동 재질의 원통형 양극 노즐로 구성되어 있으며, 자세한 전극 형상 및 설계값을 Fig. 4에 나타내었다. 또한, 아크히터의 운전 조건을 Table 1에 나타내었다.

2.3 플라즈마 특성 진단

Fig. 4와 Table 1과 같은 토치 및 운전조건에서 발생된 아크 플라즈마 유동에 대해, 엔탈피 탐침을 아크히터 노즐로부터 22 mm ($z = 22$ mm) 떨어진 곳에서 시작하여 노즐 중심축을 따라 2 mm 씩 노즐 가까이 다가가면서 측정 실험을 수행하였으며 아크히터 노즐로부터 16 mm ($z = 16$ mm) 떨어진 지점에서 탐침 철두 부분의 파손이 발생함을 관찰하였다. 이 관찰을 바탕으로 Fig. 5에 $z = 22$ mm에서 $z = 18$ mm 사이 각 측정위치에서 얻은 플라즈마 온도 및 속도 값과 식 (5) - (8)을 써서 플라즈마 온도 및 속도의 함수로 나타낸 $q''_p = 10^8$ W/m² 특성곡선을 함께 도시하였다. Fig. 5로부터, 파손이 일어나지 않은

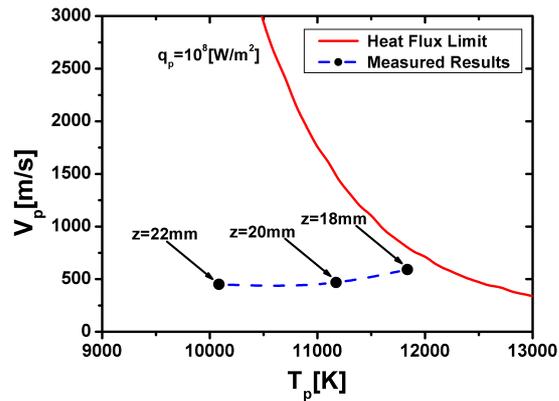


Fig. 5. Comparison between the enthalpy probe measurement results and characteristic curve of $q''_p = 10^8$ W/m² as a function of plasma temperatures and velocities in Eq. (5)

영역인 $z = 22$ mm에서 $z = 18$ mm 사이에서 발생된 플라즈마는 400 - 600 m/s 사이의 속도 범위와 9,000 - 12,000 K 사이의 온도 범위를 가지는 것으로 예측되었으며, 아크히터 출구로부터 멀어질수록 온도와 속도가 함께 떨어지므로 이에 따라 탐침 침두에 전달되는 열속도 줄어듦을 알 수 있다.

또한, $z = 18$ mm에서 측정된 플라즈마 온도 12000 K 와 속도 600 m/s에 대해서 식 (5) - (8) 을 이용하여 플라즈마로부터 탐침침두로 전달된 열속을 계산해 보면 약 5×10^7 W/m² 이 전달된 것으로 판단된다. 한편, $z = 16$ mm에서 탐침 침두 부분의 파손이 일어난 이유는 탐침이 노즐 가까이, 고온 고속의 아크 플라즈마 유동 속으로 접근할수록 플라즈마로부터 탐침 침두로 전달되는 열량이 급격히 증가하였기 때문인 것으로 보인다. 예를 들어, 실험에 사용된 스테인레스 스틸관이 녹는데 필요한 열속을 아래 식 (9)를 사용해서 짐작 해 보면, 탐침에 전달되는 열속이 10^8 W/m² 정도이면, 0.3 mm 두께의 외부 스테인레스 스틸관이 녹을 것이라고 여겨진다.

$$q''_p = -k_s \frac{\partial T}{\partial r} \approx -k_s \frac{\delta T_s}{d} \quad (9)$$

여기서, k_s 는 스테인레스 스틸의 열전도도이며, δT_s 는 d 의 두께를 갖는 탐침 바깥쪽 관에서 플라즈마에 노출된 표면과 냉각수와 닿아있는 안쪽 표면 사이의 온도차이다. 냉각수와 닿아있는 안쪽 표면은 냉각수 온도인 40 °C, 플라즈마에 노출된 표면의 온도는 스테인레스 스틸의 용점인 1420 °C를 적용하였다. 따라서, $z = 16$ mm에서 더 높은 값을 가질 것으로 생각되는 플라즈마 온도와 속도에서는 설계 제작된 엔탈피 탐침 파괴에 충분한 열속인 10^8 W/m² 까지 전달되었을 것으로 사료된다.

Fig. 6과 7은 $z = 18$ mm 와 $z = 22$ mm 에서 측정된 반경방향 온도분포 및 속도분포를 서로 비교해 놓은 것이다. 각 그림에서 $r = -2$ mm에서 $r = 2$ mm 범위까지의 온도 및 속도 값에 대해 표시된 오차막대는 플라즈마 중심에서의 엔탈피 및 속도 측정 시 발생하는 오차를 평가하기 위해, 식 (10) 및 (11)과 같이 표현되는 플라즈마 온도 및 속도에 대한 표준 오차 분석 기법을 사용하여 측정된 값으로 예측된 해당 온도 및 속도와 함께 나타낸 것이다.

$$\left(\frac{\delta h_i}{h_i}\right)^2 = \left(\frac{\delta \dot{m}_c}{\dot{m}_c}\right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{m}_g}{\dot{m}_g}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{\Delta T_s - \Delta T_t}\right)^2 \quad (10)$$

$$\left(\frac{\delta u}{u}\right)^2 = \frac{1}{4} \left[\left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{\delta \rho(T_p)}{\rho(T_p)}\right)^2 \right] \quad (11)$$

식 (10)에서 우변의 δ 는 냉각수 유량 \dot{m}_c , 포집기 체 유량 \dot{m}_g 및 냉각수 온도 T 를 측정하기 위한 장비들의 불확정성 범위를 나타내는데, 본 논문에서는 각각 2.2절에서 설명한 바 있는 터빈 유량계, MFC 및 K-type 열전대의 기기 오차범위 값을 사용하였으며 δh_i 는 이로부터 계산되는, 측정 엔탈피 값의 오차 범위이다. 마찬가지로 식 (11)에서 우변의 δ 는 전압 P_t 와 탐침 주변 플라즈마 기체의 압력 P_a 의 차압 Δp 와 플라즈마 온도 T_p 에서의 Ar 밀도를 계산하기 위한 장비들의 불확정성 범위이며, δu 는 이로부터 측정되는 속도 값의 오차 범위이다.

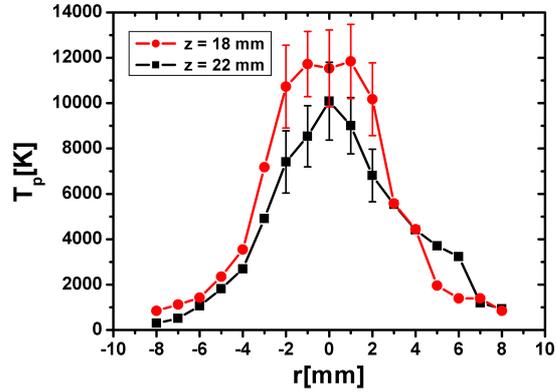


Fig. 6. Comparison between radial profiles of temperatures measured at $z = 18$ mm and $z = 22$ mm

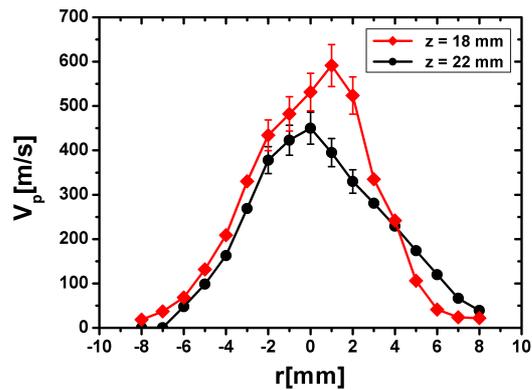


Fig. 7. Comparison between radial profiles of plasma velocities measured at $z = 18$ mm and $z = 22$ mm

Fig. 6 및 7로부터, 17 kW 급 비이송식 DC 아크 히터를 사용하여 만들어 낸 아크 플라즈마 유동은 중심축을 중심으로 직경 약 4 mm, 길이 약 22 mm 이내의 영역에서만 10,000 K, 400 m/s 이상의 고온, 고속을 유지하는 상대적으로 부피가 작고 중심축을 중심으로 집중된 형태의 아크 플라즈마 유동임을 알 수 있다. 또한, 제작된 엔탈피 탐침 시스템을 이용하여 측정된 속도값에 대한 표준오차분석결과 오차는 5% 미만으로 만족할 만한 수준이었으나, 온도 측정값은 약 20%의 오차를 가지는 것으로 나타났다. 이는 주로 K-Type 열전대의 측정오차범위 때문에 발생하는 것으로 분석되었으며, 앞으로 열전대의 측정 오차를 줄일 경우, 엔탈피 탐침법의 정확성은 더욱 향상될 것이라 여겨진다.

III. 결 론

전북대학교에서 구축 중인 2.4 MW 급 지상 공력가열장치의 아크 플라즈마 유동 특성 측정을 위해 엔탈피 탐침법을 적용하기 위한 기본적인 실험을 내경 1.5 mm, 외경 4.8 mm를 갖는 엔탈피 탐침을 설계 제작하고 17 kW 급 비이송식 직류 아크히터를 사용하여 수행하였다. 실험 결과, 17 kW 급 아크히터의 경우, 중심축을 중심으로 직경 약 4 mm, 길이 약 22 mm 이내의 영역에서 플라즈마 온도 10,000 K, 속도 400 m/s 이상의 고온, 고속 아크 플라즈마 유동을 발생시킨다는 것이 확인되었다. Sibulkin⁽⁷⁾이 제안한, 뭉뚝한 침두를 가진 축대칭 물체에 대한 층류, 비압축성 열경계층 해석모델을 이용하여 측정된 플라즈마 온도와 속도값으로부터 엔탈피 탐침의 최대 열속 부하를 살펴본 결과, 12,000 K 및 600 m/s 이상의 온도와 속도를 갖는 아크 플라즈마 유동의 경우, 약 5×10^7 W/m²의 열속을 전달할 수 있고, 이는 엔탈피 탐침이 견딜 수 있는 최대 열속에 가깝다는 것을 알았다. 최근, 약 11 km/s의 속도로 지구 대기 중 재진입하는 비행체의 열차폐체 개발을 위해 필요한 아크 플라즈마에 의한 열속 환경 모사를 위한 이태리, 70 MW 급 SCIROCCO 아크히터가 $0 \sim 2 \times 10^8$ W/m²의 정제 열속을 구현할 수 있도록 개량되고 있는 반면⁽²⁾, 기존의 대표적인 열속 탐침인 상용 Gardon 게이지⁽⁹⁾의 경우, $0 \sim 5 \times 10^7$ W/m², 상용 Schmidt-Boelter 센서⁽¹⁰⁾의 경우, $0 \sim 2 \times 10^5$ W/m²의 열속만 측정할 수 있기 때문에, 10^8 W/m² 이상의 열속을 가진 플라즈마 유동 해석에 필요한 정보를 제공하는 데 한계가 있으나,

엔탈피 탐침은 상대적으로 이들 열속 측정장치와 비슷하거나 더 넓은 범위의 열속 조건에서 단순 열속 (또는 엔탈피) 뿐만 아니라 10^8 W/m² 이상의 열속을 가진 고엔탈피 플라즈마 유동장의 해석과 유체에 꼭 필요한 정보들인 플라즈마의 온도, 속도 및 농도를 한꺼번에 측정할 수 있어 고출력 공력가열장치 해석용 기본 진단 도구로서 널리 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, 엔탈피 탐침의 속도 측정 방식은 중심축을 통해 측정되는 유동의 전압으로부터 식 (4)와 같은 베르누이 원리 또는 식 (4)에 대해 레이놀즈 수 및 마하 수에 따라 일부 보정된 베르누이 원리⁽⁵⁻⁶⁾에 기반하여 그 크기를 유도하는 방식이므로, 저압 초음속 플라즈마 환경에 삽입된 엔탈피 탐침의 경우, 본 논문의 가정과는 달리, 탐침 주변을 흐르는 플라즈마 기체의 압력 P_0 를 별도로 측정하여야 한다. 이를 위해, Blais 등⁽¹¹⁾은 엔탈피 탐침의, 별도의 췌기형 탐침을 만들고, 탐침 침두에 중심선으로부터 약 45 도 되는 지점에 텅을 내어 P_0 를 따로 측정된 뒤, 다시 엔탈피 탐침을 교체 삽입하여 정체압 P_s 를 측정하는 방법으로 초음속 압축성 유동 특성 진단을 수행한 바 있다. 또한, 플라즈마 온도 역시, 저압 초음속 유동 상황에서 발생하는 비평형 현상에 대한 고려가 필수적이므로, 플라즈마 전자밀도 및 온도 측정 기술과 연계해야 한다. 특히, 플라즈마 발생기체로서 Ar 대신 공기를 사용할 경우, 초음속 플라즈마 상태에서 발생하는 화학적 비평형 효과를 진단하고 플라즈마 온도 등에 반영하기 위한 기법의 추가 개발이 필수적이며, 이를 위한 엔탈피 탐침의 개량이 더 진행될 필요가 있다.

참고문헌

- 1) 박철, "A Road Map to the Moon", *한국항공우주학회 2008년도 추계학술발표회 논문집 2*, Nov., 2001, pp. 1292~1296.
- 2) Filippis, F. D., Vecchio, A. D., Martucci, A., Trifoni, E., Marraffa, L., Savino, R., Paterna, D., "70 MW Plasma wind tunnel up-grades for ESA AURORA TPS testing", 4th International planetary probe workshop, 27 June - 30 June, 2006, Pasadena, CA, USA.
- 3) Gray, J., Jacobs, P. F., Sherman, M. P., "Calorimetric probe for the measurement of extremely high temperatures", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 33(7), 1962, pp. 738~741.

- 4) Swank, W. D., Fincke, J.R., Haggard, D.C., "Modular enthalpy probe and gas analyzer for thermal plasma measurements", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 64, 1993, pp. 56~62.
- 5) Rahmane, M., Soucy, G., Boulos, M.I., "Analysis of the enthalpy probe technique for thermal plasma diagnostics", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 66(6), 1995, pp. 3424~3431.
- 6) Fincke, J.R., Swank, W. D., Snyder, S.C., Haggard, D.C., "Enthalpy probe performance in compressible thermal plasma jets", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 64(12), 1993, pp. 3585~3593.
- 7) Sibulkin, M., "Heat transfer near the forward stagnation point of a body of revolution", *J. Aeronautical Sciences*, 1952, pp. 570-571.
- 8) Boulos, M.I., Fauchais, P., Pfender, E., "Thermal Plasmas : Fundamentals and Applications Volume I", Plenum Press, 1994.
- 9) www.vatell.com
- 10) www.hukseflux.com
- 11) Blais, A., Jodoin, B., Dorier, J. L., Hollenstein, C., "Inclusion of aerodynamic non-equilibrium effects in supersonic plasma jet enthalpy probe measurements", *J. Therm. Spray Technol.* Vol. 14(3), 2005, pp. 342~353.