

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(9), 700-707(2013)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.9.700>

0.4 MW 급 분절형 아크 히터를 이용한 초음속 플라즈마 풍동 특성 실험

김민호, 이미연, 김정수, 최재홍, 서준호*, 문세연, 홍봉근

Experimental Analysis of a Supersonic Plasma Wind Tunnel Using a Segmented Arc Heater with the Power Level of 0.4 MW

Min-Ho Kim, Mi-Yeon Lee, Jeong- Soo Kim, Chea-Hong Choi, Jun-Ho Seo*

Se-Yeon Moon and Bong-Guen Hong

High-enthalpy Plasma Research Center, Chonbuk National University

ABSTRACT

Experimental analyses on a supersonic plasma wind tunnel of CBNU (Chonbuk National University) were carried out. In these experiments, a segmented arc heater was employed as a plasma source and operated at the gas flow rates of 16.3 g/s and the total currents of 300 A. The input power reached ~350 kW with the torch efficiency of 51.4 %, which is defined as the ratio of total exit enthalpy to the input power. The pressure of plasma gas in the arc heater was measured up to 4 bar while it was down to ~45 mbar in a vacuum chamber through a Laval nozzle. During this conversion process, the generated supersonic plasma was expected to have a total enthalpy of ~11 MJ/kg from the measured input power and torch efficiency. In addition to the measurement of total enthalpy, a cone type probe was inserted into the supersonic plasma flow in order to estimate the angle between shock layer and surface of the probe. From these measurements, the temperature and the Mach number of the supersonic plasma were predicted as ~2,950 K and ~3.7, respectively.

초 록

0.4 MW 급 분절형 아크 히터를 장착한 전북대학교 플라즈마 풍동의 초음속 유동 특성 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 실험에 사용된 분절형 아크 히터와 초음속 노즐은 16.3 g/s 의 질량유량에 대해 전극 당 150 A, 전체 300 A의 입력전류 조건으로 운전되었으며, 운전 결과 350 kW의 입력전력과 약 51.4 %의 열효율이 측정되었다. 이 때, 아크 히터 내 고엔탈피 플라즈마의 내부압력은 약 4 bar 로 측정되었으며, 이를 초음속 노즐을 통해 압력 45 mbar로 유지되는 진공챔버 내로 팽창시킴으로써, 전체 엔탈피 11 MJ/kg을 가진 초음속 플라즈마 유동을 얻을 수 있었다. 전체 엔탈피 측정과 함께, 생성된 초음속 플라즈마 유동에 대해 원뿔각 30°를 가진 원뿔 탐침을 삽입하여 경사 충격파와 이루는 각을 측정하였으며, 이 측정값들로부터, 발생된 초음속 플라즈마의 온도와 마하 수는 각각 약 2,950 K 및 약 3.7에 이를 것으로 예상되었다.

Key Words : Supersonic Plasma(초음속 플라즈마), Plasma Wind Tunnel(플라즈마 풍동), Segmented Type Arc Heater(분절형 아크 히터)

† Received: April 6, 2013 Accepted: August 19, 2013

<http://journal.ksas.or.kr/>* Corresponding author, E-mail : jhseo@jbnu.ac.kr

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

I. 서 론

우주 비행체가 대기권 밖에서 지구로 재진입(reentry)할 때에는 빠른 속도로 낙하하는 비행체와 공기와의 마찰에 의해 비행체 외벽에 수천 K 이상의 초음속 플라즈마 유동장이 형성된다 [1-3]. 따라서, 우주 비행체의 안전한 지구 귀환을 위해서는 이와 같은 극한 환경에서의 비행을 가능하게 해주는 열차폐체의 개발이 선행되어야 한다. 특히, 연구 개발된 열차폐체의 경우, 우주 비행체에 직접 적용되기 전, 지상 성능 시험이 필수적인데, 이를 위해선, 수천 K 이상의 초음속 유동을 제공할 수 있는 플라즈마 풍동 시설이 요구된다. 이와 같은 필요성에 따라, 일본, 유럽, 미국 등 많은 우주 선진국들은 수백 kW에서 수십 MW에 이르는 다양한 출력 규모의 초음속 플라즈마 풍동 시설을 구축해 왔다 [4-12]. 일반적으로, 플라즈마 풍동 시설은 공기 풍동과는 달리, 플라즈마 아크히터를 이용하여 공기를 수천 K에서 수만 K 까지 가열시킨 다음, 아크히터 출구에 부착된 수렴-확장형 노즐을 통해, 초음속으로 팽창시키는 구조를 가지고 있다. 특히, 장착되는 플라즈마 아크히터 형태와 출력 규모에 따라, 다양한 온도 범위와 마하수 조합 및 크기를 가진 초음속 플라즈마 유동을 얻을 수 있기 때문에, 고주파 유도결합 플라즈마 아크히터 [4-6], 막대-노즐형 비이송식 아크히터 [7,8], 분절형 아크 히터 [8-12]와 같은 여러 가지 형태의 플라즈마 아크히터들이 채택되고 시험 평가된 바 있다. 이 중, 분절형 아크 히터들은, MW 수준으로의 출력 증대가 용이할 뿐 만 아니라 고출력 운전조건에서도 전극 부식에 의한 오염을 최소화할 수 있어서, 고출력 풍동 시설의 초음속 플라즈마 아크히터로서 상대적으로 많이 활용되고 있다.

한편, 우리나라의 경우, 최근 우주개발에 대한 국가적 관심에 힘입어 열차폐체 시험 검증이 가능한 0.4 및 2.4 MW 급 초음속 플라즈마 풍동 장치가 전북대학교에서 국내 최초로 구축되고 있다. 이 두 풍동 장치는 모두 분절형 아크 히터를 초음속 플라즈마 발생기로서 채택하고 있는데, [13-14], 본 연구에서는, 이 중, 0.4 MW 급 분절형 아크 히터를 장착한 플라즈마 풍동의 초음속 유동 특성에 대한 실험결과를 분석하였다. 실험에 사용된 분절형 아크 히터는 최대 출력에 가까운 약 350 kW의 입력전력 조건에서 운전되었으며, 이로부터 나오는 초음속 플라즈마에 대해, 원뿔형 탐침을 사용하여 유동의 마하 수를 측정하였다. 또한, 분절형 아크 히터 및 초음속 노즐의

냉각수 온도 상승을 계측하여 아크 히터와 노즐을 빠져나간 플라즈마 유동의 전체 엔탈피 값을 조사하였으며, 측정된 마하 수와 전체 엔탈피 값으로부터 발생된 초음속 플라즈마의 평균온도를 유추하였다.

II. 본 론

2.1 0.4 MW 급 분절형 아크히터 및 초음속 플라즈마 풍동

Figure 1은 본 연구를 위하여 사용된 전북대학교 초음속 플라즈마 풍동의 외관 사진이다. Fig. 1에서 나타낸 바와 같이, 설치 완료된 초음속 플라즈마 풍동은 분절형 아크 히터(Segmented Arc Heater)를 중심으로, 초음속 플라즈마를 발생 및 유지시키기 위한 진공챔버(Vacuum Chamber), 아크 히터 전극에 직류 전류를 인가하는 MW 급 전원부(DC Power Supply), 아크 플라즈마 형성을 위한 공기와 아르곤을 공급하는 가스 공급부(Gas Supply), 발생된 고엔탈피 플라즈마로부터 아크 히터 및 진공챔버 등으로 전달되는 열을 제거하기 위한 냉각수 공급부(Cooling Water Supply) 등으로 주요하게 구성된다. 또한, 진공챔버 내부에는, 초음속 플라즈마 유동의 마하 수와 열유속을 진단할 수 있는 탐침들과 열차폐체 시편을 장착하고 제어할 수 있는 기관 조작부(Substrate Manipulator) 및 팽창된 초음속 유동을 아음속 유동으로 전환하기 위한 디퓨저(Diffuser)가 설치되어 있으며, 디퓨저를 통해 압축된 플라즈마 유동은 열교환기(Heat Exchanger)를 거쳐 냉각된 다음, 진공 펌프를 거쳐 빠져 나간다. 진공 펌프의 후단은 요소수(Urea) 및 SCR(Selective Catalytic Reduction)을 이용해 NOx를 제거할 수 있는 후처리 시설(NOx Removal System)과



Fig. 1. A Layout of 0.4 MW class supersonic plasma wind tunnel constructed at CBNU (Chonbuk National University)

Table 1. Specifications of main parts consisting of the supersonic plasma wind tunnel at CBNU (Chonbuk National University)

| Consisting Parts | Specifications |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| • DC Power Supply | • Output Power : 1.2 MW (0.6 MW × 2) • Current per Electrode : 500 A DC Max. |
| • Gas Supply | • Air : 5~20 g/s • Ar : 0.5~2 g/s |
| • Cooling Water Supply | • For Arc Heater : ~1200 lpm @ 20 bar • For Others : ~ 1200 lpm @ 4bar |
| • Vacuum Chamber | • Size : Ø 1.5 m x L 2 m |
| • Diffuser & Heat Exchanger | • Cooling Capacity : ~1MW |
| • Vacuum Pump System | • Pumping Speed : ~200 m ³ /min @ 1 bar |
| • NOx Removal System | • ~50,000 ppm can be reduced down to ~100 ppm at air mass flow rate of ~88 g/s |

연결되어 있어, 실험을 통해 발생된 환경부담 물질을 최소화한 다음 대기로 배출할 수 있도록 구성되었다. 덧붙여, 열 유속 탐침을 포함한 플라즈마 진단 시스템을 비롯하여, 각 구성 장비의 작동 상태를 판단할 수 있는 계측 신호들은 모두 PLC (Programmable Logic Controller) 기반의 데이터 계측 시스템을 통해 수집되고 처리된 후, HMI (Human Machine Interface) 화면에 표시되도록 설계 제작되었다. 이 외, 위에서 설명한 초음속 플라즈마 풍동 장비의 각 구성 장치들에 대한 주요 제원을 Table 1에 나타내었다.

Figure 2는 전북대학교 초음속 플라즈마 풍동에 장착된 0.4 MW 급 분절형 아크 히터의 단면에 전기 입력 방식을 덧붙여 도시한 것이다.

먼저, Fig. 2의 단면도에 잘 나와 있듯이, 분절형 아크 히터는 아크 플라즈마를 형성하는 양극 (Anode)과 음극(Cathode) 사이에 디스크 형태의 간극을 묶음 (Disk Pack) 형태로 다수 삽입하여 가둠관(Constrictor) 길이를 자유롭게 늘일 수 있도록 고안된 플라즈마 발생기이다. 이러한 구조

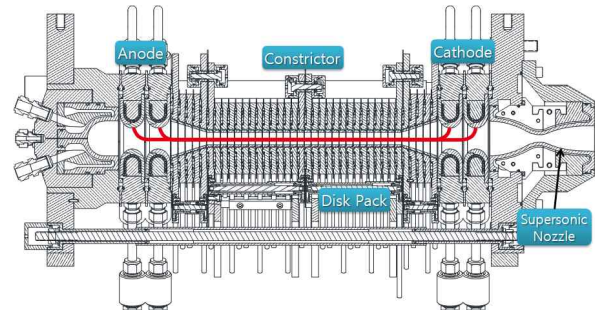


Fig. 2. A cross-sectional view of 0.4 MW class segmented type arc heater

적 특징 때문에, 분절형 아크 히터는 가둠관의 길이 증가에 따른 아크 길이를 길게 함으로써, 지나친 전류 증가 없이 아크 전압을 변화시킬 수 있고, 이에 따라, 아크 전류에 의한 전극 손상을 최소화하면서도 고출력 운전이 가능하다는 장점을 가지게 된다. 본 실험에 사용된 분절형 아크 히터의 경우, 전극 내부에 자석 등을 삽입하여, 각 전극 표면에 붙는 아크 점들에 대해 회전방향 로렌츠힘을 발생시키고, 이로 인한 고속 회전 운동을 유도함으로써, 전극부식에 의한 오염도를 더 낮게 유지할 수 있다는 특징이 있다. 또한, 간극으로 형성된 좁은 가둠관에 플라즈마 형성 기체를 균일하게 공급하는 방식이어서, 상대적으로 길게 늘어진 아크에 대해서도 안정된 플라즈마를 얻을 수 있다. 이와 같은 분절형 아크 히터의 구조적 특징과 출력 별, 전극, 간극 및 가둠관 등의 규격 범위 등은 해석적 해 [13]와 수치해석[14] 등을 통해 살펴본 바 있으며, 이 외, 본 연구에 사용된 장비의 상세설계 및 제작은 캐나다 Tekna사에서 진행하였다.

Figure 3은 Fig. 2에서 분절형 아크 히터 출구에 부착된 수렴-확장형 초음속 노즐의 형상을 주요 설계 변수값과 함께 도시한 것이다. 만약, 생성된 플라즈마 유동이 열량적으로 완전 기체라면, 질량보존법칙으로부터 유도된 아래 식 (1)을 이용하여 Fig. 3의 초음속 노즐을 통해 발생하는 유동의 마하 수를 예측할 수 있다.

$$\frac{A_c}{A_*} = \frac{1}{M} \left(\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (1)$$

위 식 좌변의 A_c 와 A_* 는 각각 노즐 출구와 노즐 목의 단면적을 표현한 것으로, 이 두 단면적의 비, A_c/A_* 는 Fig. 3에 도시된 노즐 목과 출구 직경 비의 제곱에 해당한다. 또한, 식 (1)의 우변에서, M 은 노즐 출구에서의 마하 수를 의미하며, γ 는 플라즈마 기체의 비열 비를 나타낸 것이다.

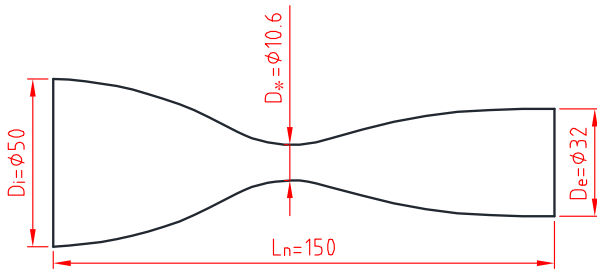


Fig. 3. The main design parameters of a convergent-divergent nozzle for the generation of supersonic plasma, which is attached to the arc heater exit in Fig. 2. (D_i : Diameter of inlet, D_e : Diameter of outlet, D_* : Diameter of nozzle throat, L_n : Length of nozzle)

Table 2. Specifications of the 0.4 MW class segmented type arc heater equipped with supersonic plasma wind tunnel at CBNU

| Item | Specification |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| • Input Power | • Max. 450 kW |
| • Current per electrode | • Max 250 A (total 500 A) |
| • Specific Enthalpy | • ≥ 13 MJ/kg @ Air flow rate of ≥ 16 g/s and Input Power of ≥ 0.4 MW |
| • Arc Heater Efficiency | • 40 ~ 60% @ 0.4 MW |
| • Electrode Contamination | • ≤ 0.05 wt% @ Air flow rate of 10 g/s and Input Power of 0.4 MW |
| • Gas Pressure in the Torch | • ~ 4.5 bar |
| • Velocity at nozzle exit | • \geq Mach 3 @ (predicted) |

예를 들어, $\gamma = 1.3$ 과 Fig. 3의 해당 직경 값들을 식 (1)에 대입하면, 설계 제작된 수렴-확장형 노즐의 경우, 완전기체에 대해 마하 수 $M = 3.5$ 를 가진 초음속 유동을 형성시킬 수 있을 것으로 기대된다. 위에서 설명한 내용을 포함하여, Fig. 3에서 도시한 수렴-확장형 노즐을 장착한 0.4 MW 급 분절형 아크 히터의 설계 사양을 Table 2에 정리하여 나타내었다.

2.2 실험 결과

0.4 MW 급 분절형 아크 히터를 장착한 초음

속 플라즈마 풍동의 동작 특성을 파악하기 위해, Ar 가스 약 0.83 g/s, 공기 약 15.51 g/s 로 구성된 혼합가스 16.3 g/s 를 아크히터 내부로 주입하고, 전극당 150 A, 전체 300 A의 직류 전류를 인가하여 플라즈마 유동을 발생시켰다. 해당 전류 및 공기 유량 조건에서, 입력전력 P_0 는 350 kW 로 측정되었으며, 아크 발생 시, Fig. 2의 아크히터 전극부에서 측정된 아크히터 내부 압력, p_0 는 3.9~4.0 bar를 유지함을 확인하였다.

Fig. 4(a), (b) 및 (c)는 상기 조건에서, 챔버 압력을 각각 45, 40 및 35 mbar로 변화시켜 가면서 아크 히터와 노즐을 빠져 나오는 초음속 플라즈마 유동의 형상을 사진으로 촬영한 것이다. 이 사진들로부터, 먼저 초음속 플라즈마 유동의 발생에 따른 shock node의 형상이 노즐 출구 바깥에 뚜렷이 나타남을 확인할 수 있다. 반면, 챔버 압력 45 mbar일 때 촬영한 Fig. 4(a)의 경우,

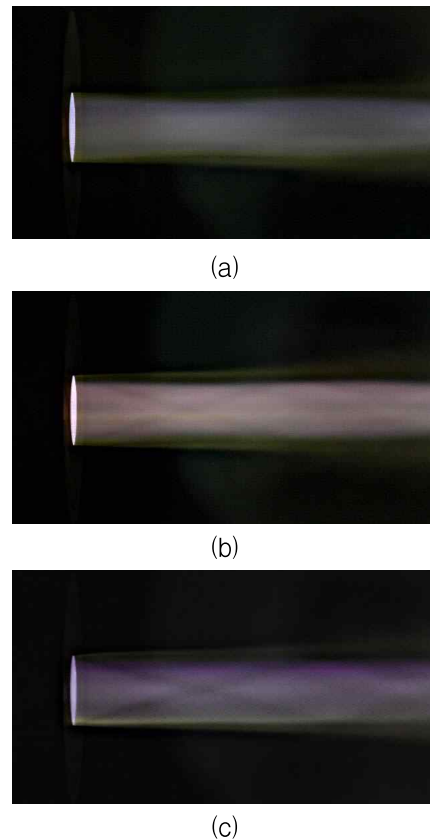


Fig. 4. The photographs of the supersonic plasma jet for the various vacuum pressures ((a) 45 (b) 40 and (c) 35 mbar), which were generated by the segmented type arc heater operated at the input powers of 350 kW. The gas mass flow rate was fixed at 16.3 g/s for each case.

shock node의 형상이 불분명해지면서, 완전팽창한 초음속 유동처럼 나타남을 볼 수 있다. 이와 같은 관찰결과를 바탕으로, 본 논문에서는 노즐 출구 이후의 영역에서 shock node에 의한 영향이 상대적으로 작을 것으로 기대되는 Fig. 4(a)의 조건에서 마하수 및 전체 엔탈피 측정 실험을 수행하였다. 먼저, Fig. 4(a)의 초음속 플라즈마 유동의 마하 수를 알아보기 위해, Fig. 5와 같이 플라즈마 제트 속으로 원뿔각이 30°인 원뿔형 탐침을, 노즐 출구로부터 105 mm 떨어진 지점에 삽입하여 원뿔에 의해 발생하는 충격파의 각도를 측정하였다. 그 결과, 플라즈마 충격파와 원뿔형 환봉의 표면이 이루는 각도는 약 7.5°로 측정되었다. 또한, γ 값의 경우, 평형상태 공기에 대한 참고문헌 [1]의 데이터에 의하면, 2,000 K - 10,000 K 사이의 온도 범위에서 약 1.1 ~ 1.3의 범위 내 값을 가짐을 알 수 있다. 이 범위의 γ 값에 대해, 측정된 각도 7.5° 및 원뿔의 각도를 잘 알려진 Taylor-Maccoll 미분 방정식의 풀이과정에 대입한 결과, 약 3.6에서 3.75 사이의 마하수를 얻을 수 있었다. 여기서, Taylor-Maccoll 미분 방정식의 수치 계산은 미국 NASA의 홈페이지에서 제공하는 프로그램[15]을 이용하였다. 특히, 발생된 플라즈마의 온도와 압력을 각각 3,000 K 및 0.1-1 bar라고 가정할 경우, 참고문헌 [1]의 데이터로부터, $\gamma = 1.18$ 을 얻을 수 있는데, 이때, 마하 수 값은 약 3.7로 계산되었다.

한편, Fig. 4(a)의 사진에서 shock node의 형상이 불분명하게 보인다 해도, 완전팽창의 조건은 아닐 수 있으므로, Fig. 4(b) 및 (c)의 경우에 비해 그 차이는 작을 수 있으나, 위에서 도출된 마하수는 앞에서 밝힌 바와 같은 γ 값에 따른 차이 뿐 만 아니라, 측정 위치에 따라서도 영향을 받을 수 있다는 점은 주의할 필요가 있다.

측정된 마하 수와 함께, 초음속 플라즈마 유동의 온도를 가늠하기 위해, 아크 히터 냉각수 온

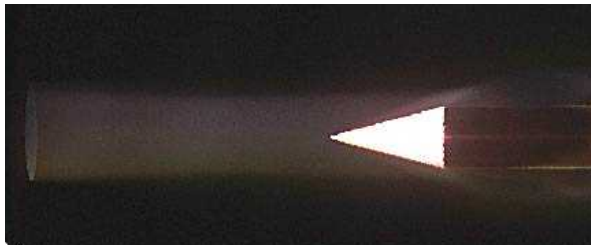


Fig. 5. The photographs and the measured angles of shock wave, which were generated by cone type probe inserted into the supersonic plasma jet of Fig. 4(a).

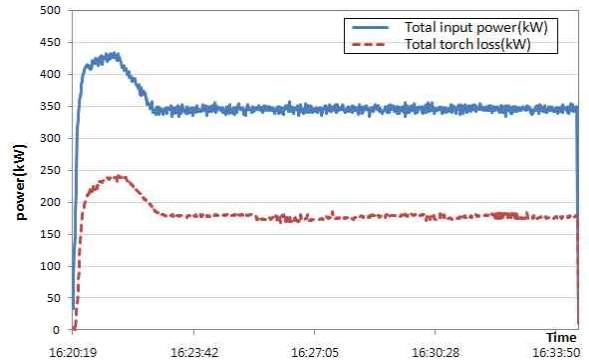


Fig. 6. The recorded trends of input power, P_0 and heat loss to coolant, Q_0 at the power level of $P_0 = 350$ kW and the gas mass flow rate of 16.3 g/s.

도 상승으로부터, 냉각수로 빠져나간 열량을 계산하고, 이로부터, 아래 식 (2)와 같이 정의되는 아크 히터의 열효율, η 를 측정하였다.

$$\eta = 1 - \frac{Q_0}{P_0} \quad (2)$$

위 식에서, Q_0 는 일정 유량으로 흘러 준 아크 히터 및 노즐 냉각수로 빠져나간 열량을 의미한다. Fig. 6은 P_0 가 350 kW 일 때, 아크 히터 및 노즐용 PLC 데이터 측정 시스템에 시간적으로 기록된 Q_0 를 P_0 와 함께 도시한 것이다.

이 기록 자료들로부터, 입력전력 350 kW 중 냉각수에 의해 제거되는 열량 Q_0 는 약 170 kW임을 알 수 있으며, 이를 식 (2)에 대입하여 계산한 아크 히터 효율, η 는 51.4%로 파악되었다. 냉각수를 통해 빠져 나간 열량 Q_0 를 제외한 입력 전력은, 복사에 의한 열손실 등을 무시할 경우, 아래 식 (3)과 같이 표현되는 열균형 방정식에 따라 초음속 노즐을 빠져 나간 가스들의 운동속도와 엔탈피를 증대시키는 데 소요되었다고 생각할 수 있다.

$$P_0 - Q_0 \approx \dot{m} \left(h_e + \frac{1}{2} u_e^2 \right) \quad (3)$$

위 식에서, h_e 및 u_e 는 각각 노즐 출구에서의 엔탈피와 속도를 뜻한다. 특히, 초음속 노즐을 빠져 나가는 가스들을 출구에서 등엔트로피 과정을 거쳐 정체시킨다면, 식 (3)의 우변은 노즐 출구에서의 전체 엔탈피 $h_{e,0}$ 로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$h_e + \frac{1}{2} u_e^2 = h_{e,0} \quad (4)$$

곧, 앞에서 계산한 아크 히터 효율값과 식 (3) 및 (4)로부터, 350 kW의 입력전력은, 16.3 g/s의 질량유량으로 초음속 노즐을 빠져나가는 기체에 대해, 약 11 MJ/kg 의 전체 엔탈피($h_{e,0}$) 값을 가진 플라즈마 유동을 형성시킬 수 있을 것이라 판단된다.

또한, 식 (4)는 마하 수 M 과 노즐 출구에서의 플라즈마 유동 온도 T_e 의 함수로 아래 식 (5)와 같이 표현가능하다.

$$h_{e,0} = h_e(T_e) + \frac{1}{2}M^2\gamma RT_e \quad (5)$$

식 (5)에 원뿔형 탐침 측정을 통해 구한 마하 수 값과 열균형 방정식으로부터 구한 전체 엔탈피 $h_{e,0} = 11$ MJ/kg을 각각 대입하면, 플라즈마 유동 온도 T_e 를 유추해 낼 수 있다. 예를 들어, 온도의 함수로 표현된 공기의 엔탈피에 대한 문헌 데이터 [16]와 마하 수 및 엔탈피에 대한 측정값들로부터 플라즈마 온도 T_e 를 구하면, 마하 수 $M = 3.7$ 조건에서 약 2,950 K가 된다.

한편, 위 실험결과 값은 노즐 냉각수를 통한 열 손실을 포함한 것임을 주의할 필요가 있다. 예를 들어, 실제 실험에서, 초음속 노즐 벽을 통해서 빠져나간 전력은, 전체 입력 전력의 10 % 가량인 39 kW 로 측정되었는데, 만약 단열 과정으로, 노즐 벽을 통한 열손실이 없었다면, 식 (4)의 전체 엔탈피 $h_{e,0}$ 값은 노즐 입구에서 약 12.8 MJ/kg으로 계산된다. 이 경우, 마하 수 $M = 3.7$ 을 식 (5)에 대입하여 T_e 를 다시 구해보면, 약 3,450 K의 플라즈마 온도를 얻는다. 곧, 팽창하는 초음속 유동을 노즐에서 냉각시킨 효과로 마하 수는 식 (1)을 통해 예상한 값 3.5 보다 조금 더 커지고, 온도는 500 K 가량 떨어진 플라즈마 유동을 얻은 것으로 이해할 수 있다.

또한, 실험값들로부터 플라즈마 온도를 도출하기 위해 식 (3)~(5)에 사용된 엔탈피 또는 이와 관련된 정압비열 C_p 는, Fig. 7에 도시한 바와 같이, 온도에 따른 공기 조성 기체들의 다양한 물리화학적 반응을 고려하여 계산되거나 측정된 값이다 [16]. 예를 들어, Fig. 7의 2,000 K 이상에서 보이는 C_p 값의 증가는 공기의 주요 성분 중 하나인 산소(O_2)의 해리로 인한 정압비열 변화가 반영된 것이며, 4,000 K 이상에서의 변화는 산소뿐 아니라 질소(N_2)의 해리 반응도 포함된 것이다. 그 결과, 2,000 K 이상에서 C_p 값은, 일반적으로 널리 알려진 완전기체의 C_p 값 1.0045 kJ/kg·K [1]와 비교하여, 더 큰 값을 가질 뿐만

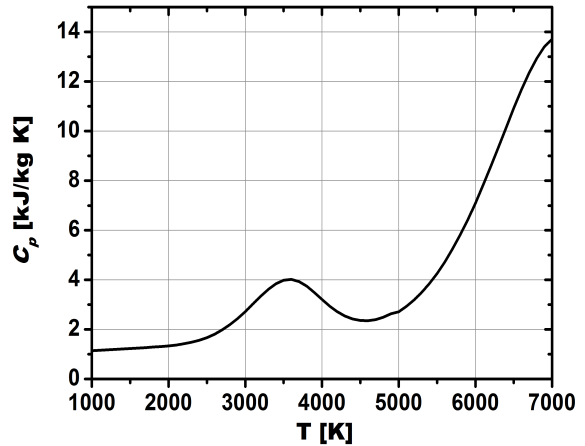


Fig. 7. Specific heat coefficient of air, C_p according to temperatures [16]

아니라 온도에 따라 증가하는 양상을 보인다. 따라서, Fig. 7의 정압비열 값을 이용하여 도출된 플라즈마 온도, 2,950 K는 같은 온도일 경우, 열량적으로 완전기체를 가정할 때 계산되는 엔탈피 값에 비해 훨씬 더 큰 값을 나타낸다. 예를 들어, 앞에서 구한 노즐 입구에서의 엔탈피 12.8 MJ/kg에 해당하는 노즐 입구 온도 T_0 를 Fig. 7의 값으로부터 추정해 보면 약 5,750 K로 계산되는 반면, 열량적으로 완전기체 ($C_p = 1.0045$ kJ/kg·K)를 가정할 경우, T_0 는 7,275 K로 1,500 K 이상 크게 나타난다.

결론적으로, 식 (1) ~ (4)는, $p_0 = 4$ bar, $p_e = 45$ mbar 및 16.3 g/s 의 질량유량 조건에서 마하 수 3.5 이상의 초음속 유동을 얻기 위해선, Fig. 3과 같이 설계된 노즐에서의 입구 온도가 $T_0 = 5,750$ K로 충분히 뜨거워야 하며, 이 뜨거운 기체가 노즐을 지나면서 $T_e = 2,950$ K로 급랭되어야만 한다는 것을 알려준다. 또한, 실험 결과 분석을 통해 얻은 상기 온도 값들은 16.3 g/s 의 질량유량을 가열하고 급랭시키는 350 kW 출력의 아크 히터 및 초음속 노즐의 열효율 특성에 따라 결정된 것이므로, 본 실험에 사용된 0.4 MW 급 분절형 아크히터는 Fig. 3과 같은 노즐을 이용하여, 마하 수 3.5 이상의 초음속 플라즈마 유동 형성에 필요한 엔탈피를 충분히 제공하도록 설계 되었다는 것을 알 수 있다.

III. 결 론

0.4 MW 급 분절형 아크 히터를 장착한 플라즈마 풍동의 초음속 유동에 대한 특성 평가 실험

을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 먼저, 실험에 사용된 분절형 아크 히터와 초음속 노즐은 16.3 g/s 의 질량유량에 대해 전극 당 150 A, 전체 300 A의 입력전류를 인가할 경우, 350 kW의 입력전력이 소모되며, 열 효율은 약 51.4 %로 측정되었다. 이 때, 아크 히터의 내부압력은 약 $p_0 = 4$ bar 로 측정되었으며, 아크 히터 내 고온, 고엔탈피 플라즈마를 초음속 노즐을 통해 압력 40 mbar의 진공챔버 내로 팽창 시킬 경우, 전체 엔탈피 11 MJ/kg 가진 초음속 플라즈마 유동을 얻을 수 있었다. 발생된 초음속 플라즈마 유동에 대해 원뿔형 탐침을 삽입하여 마하 수가 3.6 ~ 3.75 사이의 값이 될 것임을 예측하였으며, 이 마하 수 범위와 측정된 전체 엔탈피 11 MJ/kg으로부터, 플라즈마 온도와 마하수를 각각 $M = 3.7$ 및 $T_e = 2,950$ K로 유추하였다. 또한, 초음속 노즐 내 냉각수를 통한 열손실 계산을 포함하여, 노즐 입구에서의 온도는 약 5,650 K 에 이르렀을 것으로 계산하였으며, 온도에 따른 공기의 정압 비열 거동을 고려한 데이터를 적용할 경우, 이는 약 12.8 MJ/kg의 엔탈피에 해당함을 확인하였다. 상기 실험결과로부터, 본 실험에 사용된 0.4 MW 급 분절형 아크히터를 장착한 초음속 플라즈마 풍동은, 16.3 g/s의 질량유량을 가진 공기에 대해, 온도 2,900 K 이상, 마하 수 3.5 이상의 초음속 플라즈마 유동 형성에 필요한 엔탈피를 제공할 수 있다고 판단된다. 특히, 풍동시설이 제공할 수 있는 11 MJ/kg 이상의 엔탈피는 지구 저궤도 (Low Earth Orbit) 위성의 재진입 연구나 행성 대기 진입을 위한 공중 포획 (Aerocapture) 및 공중 감속 (Aerobreaking) 기술 연구 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부 재원으로 전북대학교 고온플라즈마응용연구센터 구축사업단의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한, 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것입니다. (2011-0015096)

References

1) Anderson, J., "Modern compressible flow : with historical perspective", McGraw-Hill, New York, 2002.

2) Auweter-Kurtz, M., Hald, H., Koppenwallner, G., and Speckmann, H. D., "German Experiments Developed for Reentry Mission," *Acta Astronautica*, Vol. 38, Jan. 1996, pp.47~61.

3) Marschall, J., and Fletcher, D. G., "High-enthalpy Test Environments, Flow Modeling and In Situ Diagnostics for Characterizing Ultra-high Temperature," *J. Eur. Ceram. Soc.* Vol. 30, Aug. 2010, pp.2323~2336.

4) Herdrich, G., Auweter-Kurtz M., and Kurtz, H. L., "New Inductively Heated Plasma Source for Reentry Simulations," *J. Thermophys. Heat Transfer*, Vol. 14(2), 2000, pp.244~249.

5) Bottin, B., Carbonaro, M., Zemsch S., and Degrez, G., "Aerothermodynamic design of an inductively coupled plasma wind tunnel" 32nd AIAA Thermophysics Conference (Atlanta, USA,1997), AIAA 97-2498.

6) T. Ito, K. Ishida, M. Masahito, T. Sumi, K. Fujita, J. Nagai, H. Murata and T. Matsuzaki, "Heating Tests of TPS Samples in 110 kW ICP-heated Wind Tunnel," 24th International Symposium on Space Technology and Science (Miyazaki, Japan, 2004), p.553.

7) M. Matsui, K. Komurasaki and Y. Arakawa, "Characterization of Arcjet Type Arc-Heater" Plumes 33rd Plasma dynamics and Lasers Conference (Maui, Hawaii, 2002), AIAA 2002-2242.

8) Takahashi, Y., Kihara, h., and Abe, K., "Numerical Investigation of Nonequilibrium Plasma Flows in Constrictor- and Segmented-Type Arc Heaters," *J. Thermophys. Heat Transfer*, Vol. 24(1), 2010, pp.31~39.

9) Purpura, C., Filippis, F., Graps, E., Trifoni, E., and Savino, R., "The GIBLI Plasma Wind Tunnel: Description of the New CIRA-PWT Facility," *Acta Astronaut.* Vol. 61, 2007, pp.331~340.

10) Marieu, V., Reynier, Ph., Marraffa, L., Filippisa, F., and Caristia, C., "Evaluation of SCIROCCO plasma wind-tunnel capabilities for entry simulations in CO2 atmospheres", *Acta Astronaut.*, Vol. 61, 2007, pp.604~616.

11) Purpura, C., Filippis, F., Barrera, P., and Mandanici, D., "Experimental characterisation of the CIRA plasma wind tunnel SCIROCCO test section," *Acta Astronaut.* Vol. 62, 2008, pp.410~421.

12) Takahashi, Y., Kihara. H., and Abe, K., "Turbulence and Radiation Behaviours in Large-scale Arc Heaters," *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol. 44, 2011, 085203.

13) Seo, J. H., Hong, B. G., Choi. S., Kim. D. U., "Numerical Design Study on a High-powered Segmented-type Arc Plasma Torch for a High-enthalpy Supersonic Plasma Wind Tunnel," *J. Kor. Phys. Soc*, Vol. 62[2], 2013, pp.250-257

14) Seo, J. H., Choi, S., CHoi, S. S., Hong, B. G., "Analytical Analysis of Segmented Arc Plasma Torch for Plasma Wind Tunnel Facility," *KSPE Journal*, Vol. 15[4], 2011, pp.85-93.

15) <http://www.grc.nasa.gov>

16) Boulos, M.I., Fauchais, P., Pfender, E., "Thermal Plasmas : Fundamentals and Applications Volume I", Plenum Press, New York and London, 1994.