

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(7), 547-551(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.7.547>

150kW 아크제트 유동의 엔탈피 결정

나재정*, 이정민

Determination of Enthalpy in the 150kW Arc-Jet

Jae Jeong Na* and Jeong Min Lee

Agency for Defence Development

ABSTRACT

Mass averaged and core enthalpy in the arc jet flow are obtained experimentally. The experiment is made for the 150kW Huels type arc-jet applying the test condition for the research of gasturbine engine injection cooling technique. The mass averaged enthalpy value determined by the sonic throat method is 5.5MJ/kg. The core enthalpy value determined by the heat transfer rate method is 14.3MJ/kg. Based on result of experiment, the ratio of the core to mass averaged enthalpies is 2.6.

초 록

아크제트 유동에서 질량평균 및 중심영역 엔탈피 값을 실험적으로 구하였다. 실험에 사용된 아크제트는 150kW 홀스형으로 가스터빈 엔진 분출냉각 기술 연구를 위한 실험조건을 적용하였다. 질량평균 엔탈피 값은 5.5MJ/kg로 음속목유동 방법을 적용하여 구하였다. 중심영역 엔탈피 값은 14.3MJ/kg으로 열전달 방법을 적용하여 구하였다. 실험결과 아크제트 유동에서 중심영역 대비 질량평균 엔탈피 값의 비는 2.6으로 나타났다.

Key Words : Arc-jet(아크제트), Enthalpy(엔탈피), Heat Flux(열유속), Heat Transfer Rate(열전달율)

1. 서 론

아크제트 유동 해석 혹은 시험평가에 있어서 중요한 파라미터는 열, 화학 및 운동 에너지 량, 즉 유동 엔탈피(enthalpy) 값이다. 아크제트는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 실린더 형의 전극 내부 중심축에 에너지원인 선형의 아크 기둥(arc column)이 위치하며 이 아크 기둥은 자기장 및 유입기체의 회전력에 의해 안정화되는 구조이다. 따라서 아크제트 유동 단면상에서 엔탈피 값은

중심에서 제일 높고 벽면으로 가면서 급격히 낮아진다. 아크 중심에서의 엔탈피를 중심영역(core) 혹은 중심선(centerline) 엔탈피라 하며, 벽면 영역을 포함한 엔탈피를 질량평균(mass averaged) 엔탈피라 부른다.

중심영역 엔탈피와 질량평균 엔탈피의 비는 아크제트 유동 해석 혹은 시험평가에 있어서 중요한 파라미터이다. 열전달율은 엔탈피에 비례하므로 아크제트 시험장치에서 중심영역과 질량평균 엔탈피의 비를 정확히 규명하여 아크제트 유

† Received: March 25, 2013 Accepted: June 28, 2013

* Corresponding author, E-mail : njj7284@add.re.kr<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

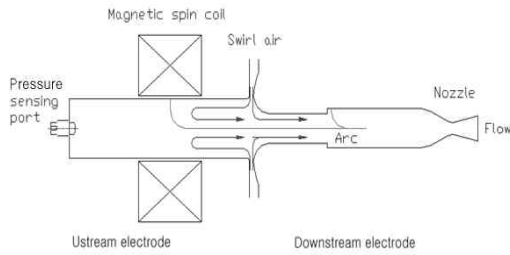


Fig. 1. Schematic of the Huels Type Arc-Jet

동 해석 및 시험평가에 반영하여야 한다. 아크 길이가 고정되어 있는 환절-수축(segmented-constricted)형 아크제트의 경우는 CFD 계산으로 엔탈피 구배(profile)를 구하는 것이 가능하다. 그러나, 홀스(Huels)형 아크제트의 경우는 전류-전압특성, 전극의 형상, 전극 용삭 및 전극 표면 산화 등의 영향에 따른 아크 길이 및 직경 변화 예측이 곤란하여 CFD 계산을 통한 엔탈피 구배 예측이 어렵다.

홀스형 아크제트에서 질량평균 엔탈피는 아크제트 인가 전력과 냉각 손실을 측정된 후 열평형(heat balanced) 방법과 음속목유동(sonic throat) 방법을 사용하여 실험적으로 구할 수 있다. 중심영역 엔탈피는 아크제트 노즐 출구 유동 내 정체점(stagnation point)에서의 열전달 방법 혹은 충격파 후단의 복사(radiation) 강도를 측정 분석하는 분광분석(spectrometric) 방법을 사용하여 실험적으로 구할 수 있다. 환절-수축형 아크제트의 경우 중심영역과 질량평균 엔탈피의 비는 최대 4 배에 이를 수 있다고 알려져 있다[1]. 하지만, 홀스형 아크제트의 경우는 아크전류-전압 특성 및 아크제트 설계 특성에 따른 아크 길이 변화로 인해 일반적인 엔탈피 구배 값을 정의하기 어렵다.

본 논문에서는 150kW 홀스형 아크제트 유동에서의 중심영역 및 질량평균 엔탈피와 그 비율을 실험적으로 구하였다. 실험조건은 현재 진행 중인 가스터빈 엔진 분출냉각 기술 연구를 위한 실험 조건을 적용하였다. 사용된 150kW 홀스형 아크제트는 Fig. 2에서 보는 바와 같다.

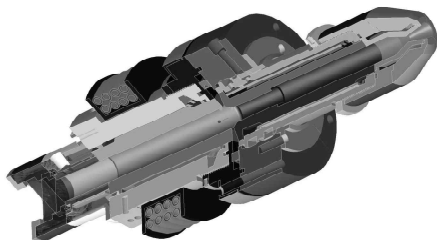


Fig. 2. 150kW Huels Type Arc-Jet

II. 본 론

1. 아크제트 작동조건

실험에 사용된 150kW 아크제트는 Fig.1 및 Fig. 2에서 보는 바와 같이 두개의 직렬 원통형 전후방 전극, 전극 사이에 위치한 와류 작동기체 유입실 및 축소 확대 노즐로 구성되어 있다. 길이 16.0cm인 전방 전극에는 작동기체 유입부에 직경 1.5cm, 길이 5.0cm인 수축부가 있다. 노즐은 전방전극 하류 끝단에 장착되어 초음속 유동을 만든다. 노즐은 축 대칭 환형 노즐로 확산 반각 12°, 노즐 목 직경 0.6cm, 그리고 노즐 출구 대비 목 면적비 4.0이다.

동일한 아크제트 작동조건으로 3회 측정된 실험 데이터를 사용하여 엔탈피를 결정하였다. 실험 조건에서 작동기체 평균 유량은 10.1g/s로 표준편차는 0.02g/s이다. 아크 전류는 평균 364.3A로 일정하게 유지하였으며 측정된 전압 평균값은 396.4V로 아크제트 평균 전력(electric power)은 144.4kW이다. 측정된 아크전류와 전압의 표준편차는 각각 0.3A와 6.0V이다. 전압력은 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 아크제트 음전극(cathode) 후면에 위치한 압력측정센서로부터 측정된다. 측정 평균 압력은 5.7atm으로 표준편차는 0.04atm이다.

2. 질량평균 엔탈피

질량평균 엔탈피는 아크제트에 인가되는 전력과 냉각 손실을 측정된 후 열평형 방법 혹은 음속목유동 방법을 사용하여 구할 수 있다. 열평형 방법에 의한 엔탈피는 전체 인가 전력에서 아크제트 전극 및 노즐에서 냉각수로 인한 열손실을 제외한 순수 전력을 작동기체 유량으로 나눔으로써 구할 수 있다. 이 때의 질량평균엔탈피 h_{av} 는 식 (1)과 같다.

$$\dot{m} \times h_{av} = E \times I - N_{wc} \tag{1}$$

여기서, I 는 아크전류, E 는 전압, \dot{m} 는 작동기체 유량, N_{wc} 는 음전극, 양전극 및 노즐에서의 냉각손실 합으로 냉각손실은 각 부분의 냉각수 유량과 입 출구 온도차를 측정하여 곱한 값이다.

음속목유동 방법에서는 아크제트 유동을 일차원, 경계층이 없으며, 유량은 밀도와 유속에 비례하는 것으로 가정한다. 밀도와 유속은 아크제트 내부 압력과 엔탈피의 함수로 엔탈피 2.3~23MJ/kg 범위의 해리 및 이온화를 수반하는 고온 기체(real gas) 열평형 상관관계식은 식 (2a)

와 같다[2].

$$h_{av} = \left(\frac{123}{\sigma} \right)^{2.52} \quad (2a)$$

여기서 h_{av} 는 질량평균 엔탈피이다. σ 는 음속유동 매개변수로 식 (2b)와 같다.

$$\sigma = \frac{\dot{m}}{A^* P_{ch}} \quad (2b)$$

여기서, A^* 는 노즐 목면적, P_{ch} 는 아크제트 내부 압력이다.

열평형 방법은 음속목유동 방법에 비해 직접적이긴 하지만, 아크제트 각 구성품 별로 측정해야 하므로 측정항목이 많아 측정오차가 더 큰 단점이 있다. 실험에 사용된 150kW 아크제트의 경우는 열평형 방법이 음속목유동 방법에 비해 최대 8%의 더 큰 오차를 갖는 것으로 알려져 있다 [3]. 따라서 본 논문에서는 보다 정확한 음속목유동 방법에 의한 질량평균 엔탈피 측정값을 적용하였다. 제시된 아크제트 작동조건에서 측정된 작동기체 유량, 아크실 내부 압력 및 노즐 목 직경으로부터 계산된 질량평균 엔탈피 평균값은 5.5MJ/kg이며 표준편차는 0.1MJ/kg이다.

3. 중심영역 엔탈피

아크제트 유동 중심영역 정체점에서 열전달율은 오직 유동 중심선에 따른 물성(properties)의 함수이다. 따라서 중심영역 엔탈피는 아크제트 유동 정체점에서 원형 디스크 형상의 구리 열량계(calorimeter)를 사용한 열전달 방법을 적용하여 열유속 q 와 정체압력 p 를 측정된 후 이를 환산하여 구한다.

실험에 적용한 열유속 측정 방법은 소위 차가운-벽(cold-wall) 정체점 열전달량 측정방법[4]으로 Fig. 3과 같은 원형 디스크 형상을 갖는 직경 5mm, 두께 10mm인 무산소동(oxygen free high conductivity copper) 열유속 측정 소자(slug)를

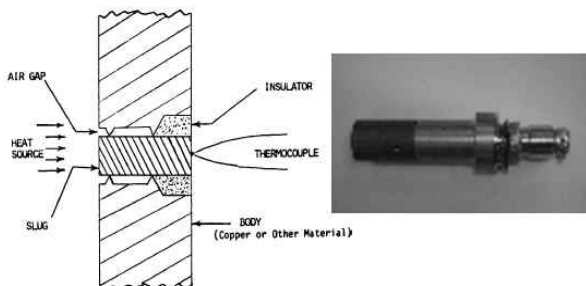


Fig. 3. Schematic of Thermal Capacitance (Slug) Calorimeter

장착한 탐침(probe)을 사용하였다. 탐침의 직경은 16.0mm이며 노즐 출구로부터 10mm 떨어진 지점에서 측정하였다. 열전대 접합 점은 디스크 뒷면 중심이고 디스크 측면과 뒷면은 세라믹 소재로 단열 처리하였다.

탐침을 사용한 정체점 측정조건은 $x=0$ 인 열유속 측정 소자 전면에서 일정한 열유속 q 가 가해지는 공력가열 환경으로 열유속 측정 소자 내부 열분해 및 표면에서의 열화학반응에 의한 형상변화가 없는 일차원 고체로 가정하였다. 탐침 전면은 차가운 벽면온도 조건에 해당하므로 적용된 아크제트 노즐 출구 유동조건에서 복사에 의한 열전달량은 대류 열전달량에 비해 1% 이하로 예측되어 무시하였다. 초기 온도는 T_0 이며 $x=l$ 인 열유속 측정 소자 후면은 단열 경계조건을 적용한다. 따라서 주어진 측정 환경은 천이(transient) 상태의 1차원 열전도 문제로 지배방정식은 식 (3a)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{in } 0 < x < l, \text{ for } t > 0 \quad (3a)$$

경계조건은 식 (3b) 및 식 (3c)와 같다.

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial x} = q, \text{ at } x = 0, t > 0 \quad (3b)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \text{ at } x = l, t > 0 \quad (3c)$$

초기조건은 식 (3d)와 같다.

$$T = T_0, \text{ for } t = 0 \quad (3d)$$

여기서, $a = \kappa / \rho c_p$ 및 κ 는 각각 열유속 측정 소자로 사용된 구리 소재의 열확산 계수(thermal diffusivity) 및 열전도도(thermal conductivity)이다. 298K에서 구리 소자의 물성인 밀도 ρ , 열전도도 κ , 열용량 c_p 값은 Table 1과 같다.

열유속은 측정된 열유속 측정 소자 뒷면 $x=l$ 인 점의 천이온도구배로부터 열전달량을 계산하여 구한다. 탐침에서 천이 온도구배 측정 시 열유속 측정 소자 뒷면까지 열입력이 침투되기에 충분한 시간, 즉 응답시간을 고려하여야 한다. 열유속 측정 소자의 응답시간은 탐침 전면 열유속 q 와

Table 1. Physical properties of copper slug

소재 종류	밀도 ρ (kg/m ³)	열전도도 κ (W/mK)	열용량 c_p (J/kgK)
무산소동	8,925.7	385.2	385.6

열량 측정 소자 계측 열유속 q 의 비, q/q_0 로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

구리 소자를 사용한 열량계의 열유속 방정식은 다음과 같다.

$$q_i = l\rho c_p \left(\frac{dT_b}{dt} \right) \quad (4a)$$

여기서, l , ρ , c_p 는 각각 구리 소자의 두께, 밀도 및 열용량이며, T_b 는 구리 소자 뒷면 온도 측정값이다.

열전도 지배방정식 식 (3)의 직접해로부터 디스크 뒷면 온도에 대한 도함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{q\alpha}{\kappa l} \left(1 - e^{-\alpha \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \right) \quad (4b)$$

따라서 열유속 측정 소자의 응답시간 t_r 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_r = \frac{l^2}{\alpha\pi^2} \ln \left(\frac{2}{1 - q_i/q} \right) \quad (4c)$$

$q/q_0=0.99$ 일 때를 열유속 측정 소자에서의 충분한 열입력 침투 조건으로 가정하여 응답시간 $t_r=0.48s$ 을 적용하였다.

측정된 천이온도는 Fig. 4와 같으며 측정 온도 구배를 적용한 식(3)의 해로부터 아크제트 중심영역에서의 열유속은 $1,489W/cm^2$ 으로 계산되었다.

정체점에서의 압력은 피토(pitot)관 형식의 탐침을 사용하여 측정하였다. 정체압 탐침의 직경은 열유속 측정 탐침과 동일하게 하여 탐침 전면 충격과 두께가 모두 동일하도록 하였으며, 열유속 측정 위치와 동일한 노즐 출구 10mm 지점에

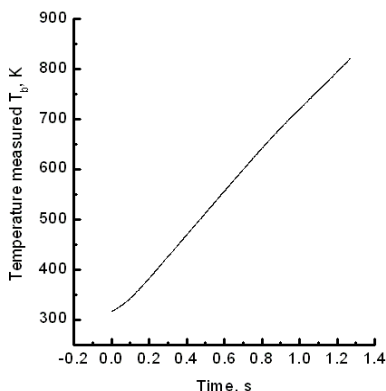


Fig. 4. Measured temperature trace from the back-face thermocouple

서 정체압을 측정하였다. 제시된 아크제트 작동 조건에서 평균 정체압력은 2.0atm이며 표준편차는 0.02atm이다.

공기를 작동기체로 하는 아크제트 유동에서 몽푁한 물체의 정체점에서 엔탈피와 열유속과의 관계는 Fay-Riddell의 평형 유동 관계식[5] 혹은 Goulard의 동결(frozen) 유동 관계식[6]으로부터 해석적으로도 구할 수도 있다. 이 경우 정체점에서의 밀도, 점성계수 및 경계층 속도구배를 충격과 영역의 비평형(non-equilibrium) 유동해석으로 구하여야 한다[7]. 그러나 본 논문에서는 해석적 방법이 아닌 측정 가능한 유동 변수로부터 엔탈피를 구하는 방법을 적용하였다. 측정된 열유속과 정체점 압력에 대한 중심영역 엔탈피 h_c 는 다음과 같은 관계식을 사용하여 환산하였다[8].

$$h_c = \frac{q}{m} \sqrt{\frac{R}{P_t}} \left(\sum_{i=1}^n \frac{\dot{m}_i}{K_i} \right) \quad (5)$$

여기서 K_i 는 작동기체 성분에 따른 기체상수로 본 논문에서 사용된 공기의 경우 $K_i=0.1235 g/cm^{3/2}\cdot s\cdot atm^{1/2}$ 이며, \dot{m}_i 는 작동기체 성분별 질유량, R 은 탐침 반경, P_t 는 정체점 압력으로 측정 평균 압력은 2.0atm, 표준편차는 0.02atm이다.

정체점에서의 유동 해석결과에 따르면 실험에 사용된 150kW 아크제트 유동은 Goulard의 동결 유동에 가까운 것으로 예측되었다[7]. 동결유동의 경우 열유속 q 는 열유속 측정 소자 표면에서의 촉매 재결합(catalytic recombination)에 영향을 받는다고 알려져 있다. 구리 소자의 경우 Goulard는 촉매 재결합 상수를 0.02~0.4 범위의 값으로 예측하였다. 그러나 아크제트 실험과 관련하여 특정 시험조건에 대한 정확한 상수 값이나 측정 방법이 알려져 있지 않아 본 논문에서는 고려하지 않았다.

측정값으로부터 환산된 중심영역 평균 엔탈피 값은 $14.3MJ/kg$ 으로 질량평균 엔탈피 값 $5.5MJ/kg$ 의 2.6배 이다. 측정 결과는 중심영역과 질량평균 엔탈피의 비가 최대 4배에 이르는 환절-수축형 아크제트에 비해 65% 정도로 비교적 낮은 값을 보인다. 홀스형 아크제트가 환절-수축형 아크제트에 비해 아크 길이가 짧은 점을 고려하면 타당한 결과라 할 수 있다.

III. 결 론

분출냉각 기술 연구를 위한 150kW 홀스형 아크제트 시험 조건에서 실험을 통해 측정된 값들

을 이용하여 중심영역 엔탈피와 질량평균 엔탈피 값을 구하였다. 질량평균 엔탈피 값은 5.5MJ/kg, 중심영역 엔탈피 값은 14.3MJ/kg으로 나타났다. 아크제트 유동 구배를 정의하는 중심영역 대비 질량평균 엔탈피 비율은 2.6으로 환절-수축형 아크제트에 비해 65% 수준으로 낮은 값을 보여 시험부 유동 구배의 균질성 비교 면에서 보다 우수한 것으로 확인되었다.

Reference

- 1) Okuno, A. F., and Park C., "Stagnation-point Heat Transfer Rate in Nitrogen Plasma Flows; Theory and Experiment," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 92, No. 3, 1970, pp. 372-384.
- 2) Winovich, W., "On the Equilibrium Sonic Flow Method for Evaluating Electric Arc Air Heater Performance," NASA TN D-2132, 1964.
- 3) Na J. J., "Operational Envelope of 150kW

Huels Type Arc-Jet," KOSCO 33thSymposium, 2006.

- 4) ASTM E457-96, "Standard test Method for Measuring Heat-Transfer Rate Using a Thermal Capacitance(Slug) Calorimeter," ASTM International, 2002.

- 5) Fay, J. A., and Riddell, F. R., "Theory of Stagnation Point Heat Transfer in Dissociated Air Flow," Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 25, No. 2, 1958, pp. 73-85.

- 6) Goulard, R., "On the Catalytic Recombination Rates in Hypersonic Stagnation Heat Transfer," Jet propulsion, Vol. 28, No. 11, 1958, pp. 737-745.

- 7) Na J. J., "Determination of Stagnation Point Parameters in the Non-equilibrium Shock Flow", KSAS Conference, 2011.

- 8) Zoby, E. V., "Empirical Stagnation-Point Heat Transfer Relation in Several Gas Mixtures at High Enthalpy Levels," NASA TN D-4799, 1968.