

고온 시험장치에서의 엔탈피 결정

나재정* · 이정민* · 강경택*

Determination of Enthalpy in the High Temperature Test Facility

Na Jae Jeong* · Lee Jung Min* · Kang Kyung Taik*

ABSTRACT

In order to determine the enthalpy profile in the high temperature transpiration cooling test facility for the air-breathing engine compartments, theoretical calculation and measurement for the flow of the test section are performed. The mass averaged enthalpy value determined by the heat balance and sonic throat methods is 10 MJ/kg. The centerline enthalpy value measured using the slug type copper calorimeter is 15 MJ/kg. Typically, the ratio of centerline and mass averaged enthalpy should be varies from 1.4 to 4. This facility has lower bound of enthalpy profile. It will be effective in testing of high temperature transpiration cooling.

초 록

공기흡입 엔진 부품의 고온 분출냉각 시험장치에서의 엔탈피값을 구하기 위하여, 시험부 유동에 대한 이론적 계산 및 측정을 수행하였다. 열평형 및 음속유동 방법에 의해 계산된 질량평균 엔탈피 값은 10 MJ/kg 이며, 슬러그형 구리 열량계를 사용하여 측정된 유동 중심에서의 엔탈피 값은 15 MJ/kg이었다. 일반적으로, 유동 중심 대 질량평균 엔탈피 비의 범위는 1.4에서 4이다. 본 시험장치는 고온 분출냉각 시험에 효과적인 낮은 엔탈피 구배를 갖는 것으로 나타났다.

Key Words: Enthalpy(엔탈피), Transpiration Cooling(분출냉각), Heat Balance(열평형), Calorimeter (열량계)

1. 서 론

고온 분출냉각 시험은 높은 유속과 온도의 가혹한 환경에서 운용되는 고성능 공기흡입 엔진

부품 개발 시 성능확인을 위한 가장 효과적인 방법이다[1]. 고온 분출냉각 시험장치에서 아크 가열식 고온 공기 가열기는 고온 고속의 유동조건을 만들어 내는 열원으로써 중요한 위치를 차지하고 있으며, 엔탈피 값 및 그 구배는 가장 중요한 유동인자이다. 아크 가열기 특성 상 시험부 유동 단면에 대한 엔탈피 분포는 유동 중심 영

* 국방과학연구소 1기술본부 5부

† 교신저자, E-mail: njj7284@kaist.ac.kr

역에서 가장 큰 값을 나타내며 이를 유동 중심축 엔탈피(Centerline Enthalpy)라고 부른다. 이에 반해, 유동 단면 전체에 대한 엔탈피 분포를 평균한 값을 질량평균 엔탈피(Mass Averaged Enthalpy)로 정의한다. 유동 중심축 엔탈피와 질량평균 엔탈피의 비는 1보다 큰 값으로 정의되며 아크 가열기를 사용하는 고온 시험장치에서 유동의 균질성을 나타내는 중요한 인자이다[2]. 시험 대상물에 대한 열전달율은 유동 엔탈피에 비례하므로 이 값이 부정확할 경우 온도 요구조건 설정을 위한 혼합실(Mixing Chamber) 설계 및 시험대상 시편에서의 유동해석에 직접적인 영향을 주게 된다.

본 연구에서는 1차원 시험부 유동에서의 정체점과 충격과 후단 유동에 대한 이론적 계산을 수행하여 질량평균 엔탈피 값을 구하고, 동일 유동 조건에서 슬러그형 구리 칼로리미터(Slug Type Copper Calorimeter)를 사용하여 유동 중심축에서의 엔탈피값을 측정 비교하였다. 본 시험 및 해석에는 200 KW급의 고온 공기 가열기 실험 데이터를 적용하였다.

최대 정체점 압력(Maximum Stagnation Pressure) 유동조건에서 열평형 및 음속유동 방법에 의해 계산된 질량평균 엔탈피 값은 10 MJ/kg이며, 슬러그형 구리 열량계를 사용하여 측정된 유동 중심에서의 엔탈피 값은 15 MJ/kg이었다. 일반적으로, 유동 중심 대 질량평균 엔탈피 비의 범위는 1.4에서 4이다. 이와 같은 결과로부터, 본 시험장치는 고온 분출냉각 시험에 효과적인 낮은 엔탈피 구배를 갖고 있음을 알 수 있었다.

2. 고온 시험장치 성능시험

본 연구에 적용된 시험장치는 200 KW급 아크 가열식 고온 공기 가열기이다. 가열기 하류 끝단에는 수축-확산 노즐이 장착되어 초음속으로 유동을 팽창시킨다. 노즐은 20 도의 확산각을 갖는 원뿔형으로 목직경은 6 mm이고 면적비는 4.0이다.

질량평균 엔탈피 계산을 위해서 15회의 실험

데이터를 취하여 적용하였다. 실험에는 최대 성능 조건을 동일하게 반복 수행하였다. 작동기체 유량은 10 g/s로써 0.02 g/s의 표준편차를 갖는다. 평균 전류 입력 값은 365 A이고 아크 전압은 508 V로 평균 출력은 211 KW이다. 전류와 전압의 표준편차는 각각 0.4 A와 10.7 V이다. 가열기 내부 압력은 후방전극 끝단에서 측정하였다. 이 때 압력은 7.9 atm으로 0.1 atm의 표준편차를 보였다.

시험장치의 효율은 열평형 방법에 의해 실험적으로 구하였다. 평균 효율은 0.52로 표준편차는 0.06이다.

3. 노즐 유동해석

노즐 출구 유동조건에서의 엔탈피 값을 정확히 예측하기 위해서는 먼저 노즐에 의해 만들어지는 유동의 열역학적 조건을 알아야만 한다. 노즐에서의 급격한 온도와 압력 강하는 열화학적 비평형상태를 야기한다. 이러한 이유로 노즐 유동해석은 비점성 비평형 유동으로 가정하여 수행하였다.

노즐 유동해석에는 수정된 1차원 노즐유동해석 프로그램을 사용하였다[3]. 원 프로그램에서는 6개의 다른 온도를 고려하고 있지만, 본 연구에서는 무거운 입자(Heavy Particle)에 대한 병진-회전(Translational-Rotational) 온도와 진동-전자(Vibrational-Electron-Electronic) 온도를 고려한 이원(Two-temperature) 온도 모델을 적용하였다.

노즐형상은 축대칭의 쌍곡선형(Hyperbolic Gometry)을 가정하였다. O, N, H, C, C), O₂, N₂, NO, OH, H₂O 및 CN을 포함하는 12개의 화학적 모델과, 진동이완[4], 무거운 입자의 충돌에 의한 5개의 화학적 해리반응 및 7개의 화학적 교환반응을 고열하였다[5]. 시험부 유동조건에서의 정체점 압력은 노즐출구 하류 10 mm 지점에서 측정하여 적용하였다. 측정된 평균 정체압력 및 표준편차는 각각 1.3 atm 과 0.02 atm 이었다.

고온 시험장치 최대 성능조건에서 얻어진 노

Table 1. Reference flow condition

Quantity	Nozzle Exit	Test Section
Mach number	2.57	3.41
Pressure, atm	3.69E-01	9.03E-02
Temperature, K	2810.8	2048.4
Vibrational Temp., K	2816.9	2066.8
Density, kg/m ³	3.65E-02	1.23E-02
Species Mol Fractions		
O	1.23E-01	1.07E-01
N	3.85E-05	3.15E-06
O ₂	5.84E-02	7.28E-02
N ₂	6.04E-01	6.07E-01
NO	3.01E-02	2.93E-02

를 유동해석 결과는 Table 1에 나타내었다. 이 유동 조건은 시험부 정체점 유동 해석 및 측정 에 대한 기준 입력 조건으로 적용되었다.

4. 엔탈피 계산 및 측정

4.1 질량평균 엔탈피 계산

시험부에서 열전달율은 유동 엔탈피에 비례한다. 이 값을 정확히 알기 위해서는 시험부 전단에 형성되는 충격파 후단에서부터 경계층 끝단까지의 유동조건을 알아야만 한다. 충격파 후단의 유동은 열화학적 비평형 유동으로 취급한다. 이 유동은 경계층 끝단에 이르러 열화학적 평형상태에 도달한다. 정체점 경계층 끝단에서의 열역학적 평형조건을 계산하기 위해서는 충격파 후단에서부터 정체점 경계층 끝단까지의 압력 상승을 고려하여야 한다. 정체점 경계층 끝단에서 유동 속도는 0이 된다. 이는 충격파 후단 조건을 시작으로 Eq. 1과 같이 운동량 방정식(Momentum Equation)을 변형 적분함으로써 얻을 수 있다.

$$\frac{dp}{d(u^2/2)} = -\rho \quad (1)$$

충격파 바로 뒷면의 유동조건은 잘 알려진 동

결유동(Frozen Flow) 에 대한 Rankine-Hugoniot 관계식을 적용하여 구한다.

내부에너지를 고려한 이원온도 모델은 Eq. 2와 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$h = \sum_i \left(\frac{C_p}{R} \right)_i 8.31434 T \gamma_i \quad (2)$$

$$\times \sum_i \frac{8.31434 \cdot 1.4388 \omega_e}{\exp\left(\frac{1.4388 \omega_e}{T_v} - 1\right)} \cdot \gamma_i$$

Equation 2에서, 오른쪽 첫 번째 항은 병진-회전 에너지를 나타내며, 두 번째 항은 진동-전자 에너지를 나타낸다. 진동에너지 T_v 계산에는 Landau-Teller 관계식을 적용하였다[5].

화학종(Chemical Species) 질량분율에 대한 변화는 Eq. 3으로 나타낼 수 있다.

$$\rho u \frac{d\gamma_i}{dx} = \dot{w}_i \quad (3)$$

Equation 3.에서, γ_i 는 화학종 i 의 질량분율이 다.

충격파 후단부터 정체점 경계층 끝단까지의 유동해석 결과는 Fig. 1으로 나타내었다.

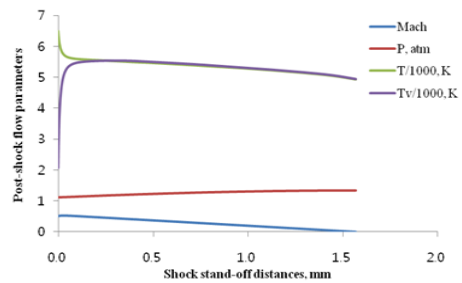


Fig. 1 Flow behavior in the shock layer

시험부 정체점에서의 유동조건 및 질량평균 엔탈피(Mass Averaged Enthalpy) 계산결과는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Calculated stagnation point parameter

Quantity	Results	
	Present	Approximation
Pressure, atm	1.33(Measured)	1.30
Temperature, K	4,906.3	
Vibrational Temp., K	4,927.4	
Density, kg/m ³	7.22E-02	
Stand-off distance, mm	1.67	
Enthalpy, MJ/kg	10.55	
Species Mol fraction		
O	1.67E-01	
N	3.63E-03	
O ₂	2.23E-02	
N ₂	5.57E-02	
NO	5.71E-02	

4.2 질량평균 엔탈피 계산

시험부 유동 중심축에서의 엔탈피(Centerline Enthalpy)는 슬러그형 구리 칼로리미터(Slug Type Copper Calorimeter)를 사용한 열전달 방법(Heat Transfer Method)을 적용하여 측정하였다. 소위 차가운 벽(Cold-wall) 정체점 열전달량 측정 방법으로 평면의 디스크 형상을 갖는 직경 16 mm의 열량계에 직경 5 mm, 두께 10 mm 인 구리 슬러그(Copper Slug)를 사용하였다. 측정된 구리 슬러그 뒷면의 온도구배로부터 열전달량을 계산하였다. 그 결과 본 연구에 사용된 시험장치에서 시험부 중심축 엔탈피 값은 15 MJ/kg으로 측정되었다. 측정에 사용한 열량계는 Fig. 2 에 나타내었다.

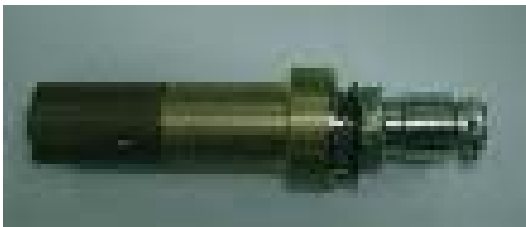


Fig. 2 Slug Type Copper Calorimeter

5. 결 론

공기흡입 엔진 부품의 고온 분출냉각 시험장치에서의 엔탈피 및 구배를 결정하였다. 시험부 유동에서의 정체점과 충격과 후단 유동에 대한 이론적 계산을 수행하여 질량평균 엔탈피 값을 구하고, 동일 유동 조건에서 슬러그형 구리 칼로리미터를 사용하여 유동 중심축에서의 엔탈피 값을 측정 비교하였다. 계산된 질량평균 엔탈피 값은 10 MJ/kg 이며, 측정된 유동 중심에서의 엔탈피 값은 15 MJ/kg이었다. 일반적으로, 유동 중심 대 질량평균 엔탈피 비의 범위는 1.4에서 4이다. 본 시험장치는 고온 분출냉각 시험에 효과적인 낮은 엔탈피 구배를 갖는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 황기영, 김유일, "공성능 비행체 엔진을 위한 분출냉각의 연구동향," 한국항공우주학회지, 제39권, 제10호, 2011, pp.966-978
2. Fay, J. A., Riddell, F. R., 1958, "Theory of Stagnation Point Heat Transfer in Dissociated Air Flow," Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 25, No. 2, pp.73-85
3. Park, C., and Lee, S. H., 1995, "Validation of Multi-Temperature Nozzle Flow Code," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 9, No. 1, pp.9-16
4. Oldenberg, R., 1989, Reaction Rate(Baulch) NASP, Status Report of the Rate Constant Committee.
5. Park, C., 1990, Nonequilibrium Hypersonic Aero-thermodynamics, John Wiley & Son, New York.