



150kW급 Huels형 아크 히터 내부의 유동 해석

한상훈¹, 변재윤¹, 김규홍^{*2}

NUMERICAL ANALYSIS OF A 150KW HUELS TYPE ARC HEATER

S.H. Han,¹ J.Y. Byeon¹ and K.H. Kim^{*2}

Numerical analysis of 150kW Huels-type arc jet was performed using compressible Navier-Stokes CFD code. To consider chemical reaction by high temperature, the flow was assumed to be chemical equilibrium states. As a turbulence and a radiation model, the two-equation k-epsilon model and the 3-band radiation model were adopted, respectively. Mass flow rate and current density were given as conditions for calculations. In this study, two kinds of mechanisms for injection of air flow were considered. One is that air is provided by left wall surface and the other is that air is injected from upper wall surface. The pressure, density and temperature contours of two cases were compared and heat transfer rates were estimated. The numerical results of two cases were not much different to each other. However, in real 150KW device, air is injected from upper wall surface with swirl. To calculate more accurately, swirl effect is must be considered.

Key Words : 아크 히터(Arc-Heater), 고온 유동(High Temperature Flow), Ausmpw+, 플라즈마(Plasma)

1. 서 론

아크 히터(아크 풍동)는 1960년대 미국, 소련(현 러시아), 등이 우주개발과 함께 지상에서 고온의 고엔탈피 유동을 구현하기 위해 만들어진 장치이다. 아폴로, 미르와 같은 유인 우주선은 지구로의 재진입시 10,000K 이상의 극고온 환경을 경험하게 되고 이로부터 우주선을 보호하기 위한 열보호구조물(TPS)을 필요로 하게 된다. 이러한 TPS를 지상에서 실험할 수 있도록 하는 장치가 아크 히터(아크 풍동)로 현재 이 장치는 미국, 러시아 뿐 아니라 프랑스, 이태리 등의 유럽연합과 일본 등의 우주 선진국들이 보유하고 있다.

한편, 아크 히터의 유동은 고온, 고엔탈피를 갖는 플라즈마 상태로 아크 히터의 고에너지를 민간 산업에 활용하는 연구와 시도가 실제로 다양한 산업현장에 적용되고 있다. 예를 들어 인조 다이아몬드, 보론 소재와 같은 고온 고강도 신소재 개발과 열플라즈마를 이용한 각종 산업 폐기물 처리, 그리고

재료의 강도를 높이기 위한 플라즈마 코팅 용사에도 사용되고 있다. 특히, 인조다이아몬드를 합성하기 위해서는 카본의 기화를 위해 아크히터의 세틀링 챔버에서 4,500K 이상의 고온이 필요한 것으로 알려져 있다.[1]

아크 히터 내부의 유동 해석에 관한 연구는 전산유체역학의 발달과 함께 많은 연구가 이루어져 왔다. 본 연구 그룹의 경우 미국 NASA 에임즈 연구소에 있는 IHF와 AHF 분절형(segmented type)아크 히터의 내부 유동을 정확하게 예측하기 위하여 지난 10여년간 연구를 수행하였고 현재 아크플로 4 코드를 보유하고 있다.[2] 아크 플로 4는 1970년대 개발된 아크 플로의 최신 버전으로 3-band 열복사 모델, 2-방정식 난류 모델, 줄가열, 로렌츠 힘을 고려할 수 있도록 개선된 코드이다. 또한, 고온, 고압의 열역학적 물성치와 전달물성치를 정확하게 고려할 수 있도록 Gibbs 에너지 최소화 방법과 kinetic 이론이 적용되어 있다.[3]

국내에서 아크 히터의 개발은 우주개발 용도가 아닌 플라즈마 코팅 및 폐기물처리와 같은 산업적 용도로 개발되고 있고 아크히터라는 용어보다 열플라즈마 발생장치로 주로 불리고 있다. 그리고, 아직까지 국내 업체의 경우 자체 설계 및 제작을 할 수 있는 업체는 거의 없다. 대학 및 연구소도 주로 수십KW급의 소형 장치에 관심을 두고 연구용으로 개발하고

1 정회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

2 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

* TEL : 02) 880-8920

* Corresponding author, E-mail: aerocfd1@snu.ac.kr



있다. 본 연구에서 수치 해석한 모델의 경우는 최근 KAIST에서 개발한 150KW급 Huels형 아크 히터로 Huels형으로는 국내에서 처음 개발된 모델이고 용량면에서 큰 축에 속하는 것으로 알려져 있다.[1]

본 연구는 150KW급 Huel형 아크히터에 대해 아크플로 4 코드를 이용하여 내부 유동에 대한 수치모사를 수행하였다. 150KW급 Huels형 아크히터는 upstream 전극과 downstream 전극사이에서 스윙(swirl) 형태로 공기가 주입된다. 본 연구는 swirl형태로 공기를 주입하기에 앞서 윗 벽면에서 분사하는 형태와 왼쪽벽면에서 공기를 주입하는 경우로 하여 계산하여 보았다. 본 연구진들은 수치적 연구와 함께 현재 KAIST에서 제작한 아크히터에 대해 실험적 연구를 수행 중에 있다. 본 연구는 실험치와 비교에 앞서 수치적으로 모사된 압력, 내부 엔탈피와 벽면 열전달량 등을 예측하여 보았다. 향후 연구로 swirl효과를 고려되도록 할 것이고 실제 실험치와의 비교를 통하여 모델링 정확도를 향상시킬 예정이다.

2. 물리적 모델링

2.1 지배방정식

본 연구에서 사용된 지배방정식은 2차원 축대칭 Navier-Stokes 방정식으로 지배방정식에는 줄가열, 열복사, 난류 현상을 고려한다. 지배방정식은 아래와 같이 정리될 수 있다. [2]

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + H = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + H_v + I \quad (1)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e_t \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho v u \\ \rho H u \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho u v \\ \rho v^2 + p \\ \rho H v \end{bmatrix},$$

$$E_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} - q_{c,x} - q_{R,x} \end{bmatrix},$$

$$F_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} - q_{c,y} - q_{R,y} \end{bmatrix},$$

$$H = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho u v \\ \rho v^2 + p \\ \rho H v \end{bmatrix},$$

$$H_v = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} - \tau_{\theta\theta} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} - q_{c,y} - q_{R,y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 열역학적 및 전달 물성치

본 연구에서는 아크 히터 내부의 유동은 화학적 평형상태에 있는 것으로 가정된다. 평형상태의 열역학적 물성치를 구하기 위해 본 연구에서는 Gibbs에너지 최소화 방법을 이용하였다.

점성계수, 열전달계수, 전기전도계수 등의 전달 물성치는 충돌적분함수를 이용하는 Chapman-Enskog의 근사화 방법에 의해 구하였다. [3]

점성계수

$$\mu = \sum_{i=1}^{NS} \left(\frac{\frac{M_i}{N_A} x_i}{\sum_{j=1}^{NS} x_j \Delta_{ij}^{(2)}} \right) \quad (3)$$

전기전도계수

$$\sigma = \frac{e^2}{kT} \frac{x_e}{\sum_{j=1, j \neq 2}^{NS} x_j \Delta_{ij}^{(1)}} \quad (4)$$

열전도계수는 병진열전도계수, 내부열전도 계수, 반응에 의한 열전도계수의 세가지 형태를 고온유동에서는 고려하게 된다.

$$K = K_{tr} + K_{int} + K_{re} \quad (5)$$

병진열전도계수

$$K_{tr} = \frac{15}{4} k \sum_{i=1}^{NS} \left(\frac{x_i}{\sum_{j=1}^{NS} a_{ij} x_j \Delta_{ij}^{(2)}} \right) \quad (6)$$



Fig.1 150KW급 아크히터의 격자계

$$K_{int} = k \sum_{i=1}^{NS} \left(\frac{\left[\frac{C_{p,i}}{R} - \frac{2}{5} \right] x_i}{\sum_{j=1}^{NS} x_j \Delta_{ij}^{(1)}} \right), \quad (7)$$

$$K_{re} = k \sum_{l=1}^{\infty R} \frac{\left(\frac{\Delta h_l}{RT} \right)^2}{\sum_{i=1}^{NS} \frac{a_{l,i}}{x_i} \sum_{j=1}^{NS} (a_{l,j} x_j - a_{l,i} x_i) \Delta_{ij}^{(1)}} \quad (8)$$

2.2 열복사 모델링

고온 유동에서는 복사열전달이 대류열전달 만큼 매우 중요한 열전달 모드이다. 복사열전달을 구하기 위해서는 한 점에서 모든 공간으로부터의 열전달을 모두 고려해야하기 때문에 계산의 시간 비용이 매우 크다. 본 연구에서는 효율적 계산과 함께 정확성을 보장하고 있는 3-band 복사 모델이 적용되었다. [3]

2.3 줄가열 모델링

이상적으로 아크에 의한 줄 가열량은 Maxwell 방정식을 풀어서 전류의 분포를 구한 후, Ohm의 법칙에 의해 구할 수 있다. 본 연구에서는 Maxwell 방정식을 직접 계산하는 대신에 constrictor 내부가 전기적으로 절연되어 있기 때문에 constrictor에서 전류는 일정하다고 가정하고 전극 부분에서 전류를 일정구배를 갖도록 한 후 줄 가열량을 구하였다. 옴의 법칙으로부터 전류밀도는 다음과 같다. [3]

$$j(x, y) = \sigma(x, y) \cdot E(x), \quad (9)$$

$$E(x) = \frac{I}{\int_0^R 2\pi y \sigma(x, y) dy} \quad (10)$$

줄가열량은 다음과 같다.

$$j(x, y) \cdot E(x) = \frac{I^2 \sigma(x, y)}{\left[\int_0^R 2\pi y \sigma(x, y) dy \right]^2} \quad (11)$$

2.4 난류 모델링

난류현상이 아크 히터 내부의 유동의 정확한 수치모사에 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 본 연구에서도 앞선 연구에서 적용된 two-equation 모델 중 아크히터 계산에 정확한 결과를 도출하였던 k-ε 모델을 적용하였다. [3]

3. 수치기법

본 연구에서 비점성 대류항에 대해서는 AUSMPW+ 기법[4]을 사용하였으며, 점성항은 중심차분 기법을 이용하였다. 시간적분기법으로는 LU-SGS 기법을 사용하여 비점성항을 내재적으로 처리할 수 있도록 하였다. 축대칭 소스텀, 줄가열, 점성항은 외재적으로 계산 되었다. 경계조건으로 본 연구에서는 공기 공급을 두 가지 경우로 하여 수치 실험해 보았다. 첫 째는 공기를 챔버 왼쪽 벽면에서 공급하는 경우로 수행하였고 다음은 실제 경우와 유사하게 왼쪽 벽면에서 공급하는 것으로 하였다. 그리고, 벽면 온도는 400K로 고정하였고, 유출 경계조건은 노즐 목 이후 유동은 초음속이기 때문에 외삽 경계조건을 주었다.

4. 수치해석결과

본 연구에서 수치해석을 위하여 적용한 150KW급 Huels 형 아크히터의 제원은 다음과 같다. 업스트림 영역은 전극부인 캐소드로 140mm, 중앙의 컨스트릭터는 50mm의 길이와 30mm의 지름, 그리고 다운스트림은 애노드로 160mm의 전극부이다.[1] 계산을 위하여 구성한 격자계는 그림 1과 같으며, 본 연구에서는 200X70의 격자계를 사용하였다.

일반적으로 아크 히터의 경우 질량유량과 전류가 유동 특성을 결정하게 된다. 본 연구에서는 공급되는 질량유량으로 8g/s, 350Amp의 전류가 공급되었을 때의 150KW급 아크히터의 내부유동 특성을 보았다.

우선 공기를 왼쪽 벽면에서 공급하였을 때의 경우 압력, 밀도 및 온도 컨투어는 그림 2와 같다. 챔버 내의 압력은 4.5 기압 정도로 일정하게 유지되고, 밀도는 공기가 공급되는 흡입구부터 아크가 생성되기 시작하는 컨스트릭터 까지 높은 밀도를 보인다. 온도의 경우 아크 코어부근에서 가장 14000 K이상의 온도 분포를 보인다.

아크 히터 내부에서의 질량 평균 엔탈피와 효율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_a(x) = \frac{\int_0^R 2\pi y \rho(x, y) u(x, y) H(x, y) dy}{\int_0^R 2\pi y \rho(x, y) u(x, y) dy} \quad (12)$$

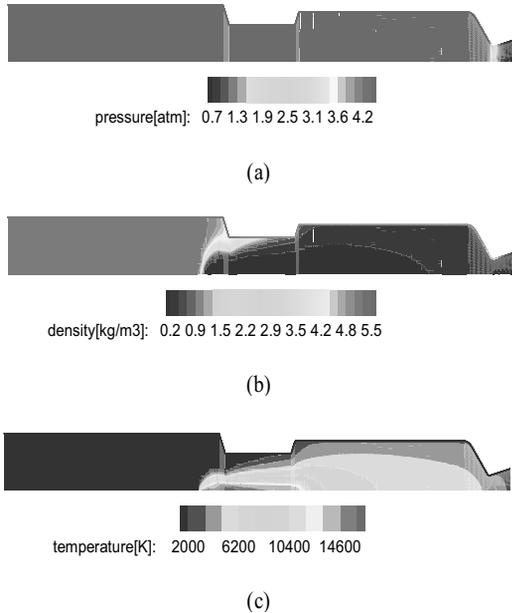


Fig. 2 왼쪽벽면에서 공기를 주입할 경우의 압력, 밀도, 온도 컨투어

$$\eta = 100 \times \left(1 - \frac{q_R - q_c}{I \cdot V} \right) \tag{13}$$

노즐 목에서의 질량 평균 엔탈피는 7.47MJ/kg 이고, 효율은 54%였으며, 전압은 298 볼트로 예측되었다. 벽면에서의 열전달량은 컨백션에 의한 것과 복사에 의한 영향으로 고려할 수 있고 노즐목까지의 축방향으로 열전달량은 그림 3과 같다. 아래 그림에서 보이듯이 업스트림 부근에서부터 컨스트릭터까지는 주로 복사에 의한 열전달량이 크고 다운스트림쪽으로 갈수록 컨백션에 의한 열전달량이 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 AHF나 IHF와 같은 대용량 아크히터와 유사한 경향을 보인다.

다음은 공기를 벽면에서 주입하였을 때의 경우 압력, 밀도 및 온도 컨투어는 그림 4와 같다.

공기를 벽면으로 주입한 경우의 압력도 챔버 내에서는 4.5atm 정도로 일정하게 유지되고 앞서 흡입구에서 주입하는 경우와 거의 같은 결과를 보인다. 밀도 및 온도의 경우 공기를 공급하는 방식이 다르기 때문에 업스트림 부근에서부터 컨스트릭터 시작 영역까지는 다소 다른 양상을 보인다. 그러나 컨스트릭터 내부에서부터 다운스트림 영역까지는 역시 앞서의 결과와 유사한 경향을 보인다.

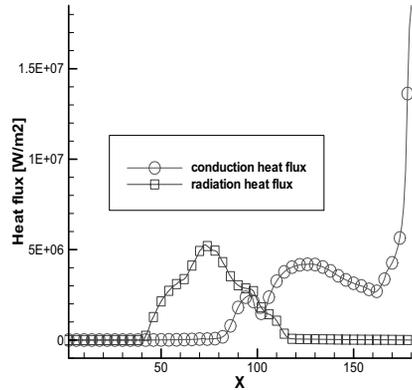


Fig. 3 복사와 대류에 의한 열전달량(왼쪽벽면에서 공기주입)

노즐 목에서의 질량 평균 엔탈피는 7.77MJ/kg 이고, 효율은 53%였고, 전압은 305볼트로 예측되었다. 질량평균 엔탈피는 앞서의 결과보다 다소 큰 값을 보이는데 이것은 고온 영역이 더 크기 때문인 것으로 사료된다. 벽면에서의 열전달량은 역시 컨백션에 의한 것과 복사에 의한 것으로 구분된다. 그림 5에서 노즐목까지의 축방향으로 열전달량을 나타내었다. 열전달 양상 역시 앞서의 결과와 유사한 경향을 보인다. 그러나, 윗 벽면에서 공급하는 경우는 업스트림영역에서도 컨백션에 의한 영향이 존재하는 것을 볼 수 있고 이것이 컨백션에 의한 열전달량을 좀 더 크게 만든다. 이에 의해 아크 히터의 효율이 약 1% 감소 한 것으로 보인다.

5. 결 론

150KW급 Huels형 아크 히터의 내부 유동에 대한 수치해석을 수행하였다. 아크 히터의 경우 공급되는 질량유량율과 전류에 따라 내부유동 특성이 결정된다. 본 연구에서는 150KW급 아크히터의 질량유량을 공급하는 방법으로 왼쪽 벽면에서 주는 경우와 윗쪽 벽면에서 스윙 효과 없이 주는 형태의 두 가지 방법을 이용해 보았다. 계산 결과 압력이나 밀도, 온도 분포 등은 국부적인 영역을 제외하고는 거의 같은 양상을 보였다. 또한, 복사나 대류에 의한 열전달량도 거의 같은 결과를 보였다. 본 연구는 실제 실험과의 비교에 앞서 현재 연구실에서 보유중인 아크플로4 코드를 이용하여 수치 실험을 해 본 결과로 실제 실험치와 비교된 결과는 없다. 150KW급 Huels형 장치의 경우 장치의 길이가 짧기 때문에 아크에 의한 줄 가열량을 정확히 해석하기 위해서는 전기장 해석이 추가되어야 할 것으로 사료되고, 실제 장치가 스윙 방식으로 공기유량이 공급되므로 계산 코드에서도 이를 고려할 수 있다

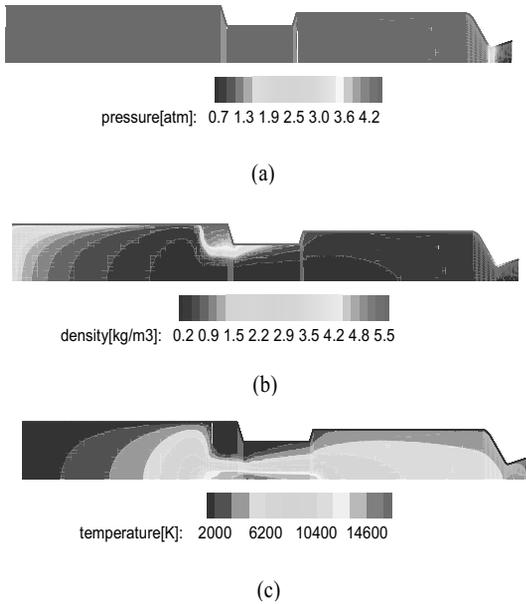


Fig. 4 위쪽벽면에서 공기를 주입할 경우의 압력, 밀도, 온도 컨투어

록 수정되어야 할 것이다. 추후 연구로 수정된 계산코드와 본 연구실에서 진행 중인 실제 실험과의 비교를 통해 더욱 정확도를 높이는 연구가 수행될 계획이다.

후 기

본 논문은 한국연구재단의 국가우주연구실(NSL: S10801000121-08A0100-12110) 프로그램과 국가 선도연구센터(ERC)프로그램의 지원으로 제작되었습니다.

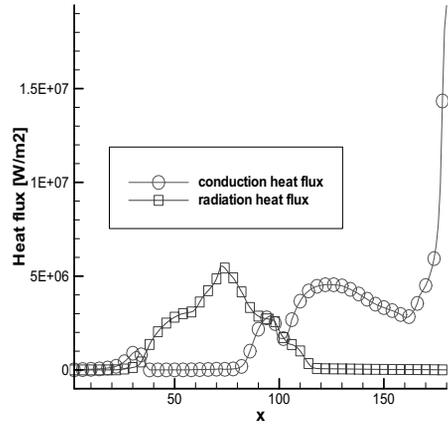


Fig. 5 복사와 대류에 의한 열전달량(윗벽면에서 공기주입)

참고문헌

- [1] 2006, Na, J.J et al., "Operational Envelope of a 150kW Huels Type Arc-jet," *KOSCO Symposium*, pp.187-195.
- [2] 2007, Lee, J.I., Kim, C. and Kim, K.H., "Accurate Computations of Arc-Heater Flows Using Two-Equation Turbulence Models," *Journal of Thermophysics and heat Transfer*, Vol.21, pp.67-76.
- [3] 2008, Lee, J.I. et al., "Analysis of Segmented Arc-Heater Flows with High Argon Concentration," *Journal of Thermophysics and heat Transfer*, Vol.22, pp.187-200.
- [4] 2001, Kim, K.H., Kim, C., and Rho, O.H., "Methods for the Accurate Computations of Hypersonic Flows: 1. AUSMPW+ Scheme," *Journal of Computational Physics*, Vol.174, pp.38-80.