



전기장 해석을 통한 아크/열 유동 해석

Numerical Analysis of Arc-Heated Flow through a solution of Electric Field

○김진수¹⁾, 오세종²⁾, 최정열³⁾

Chin-Su Kim, Jeong-Yeol Choi, Se-Jong Oh

This paper presents the results of the application of a computational fluid dynamics algorithm for the simulation of plasma flows of arc-heated jet. The underlying physical model is based on the axisymmetric form of the conservation equations that are coupled with an arc model including Ohm heating, electromagnetic forces. The arc model given as a source term in fluid dynamic equations is determined by a solution of electric potential field governed by an elliptic partial differential equation. The governing equation of electric field is loosely coupled with fluid dynamic equations by an electric conductivity that is a function of state variables. However, the electric fields and flow fields cannot be solved in fully coupled manner, but should be solved iteratively due to the different characteristics of governing equations. With this solution approach, several applications of arc flow analysis will be presented including Arc Thruster and Circuit Breaker.

1. 서론

로켓에 대해서 분류를 해 본다면 열 로켓, 전기 로켓, 그리고 원자력 로켓이 있다. 그 중에서 전기 로켓을 또다시 세분한다면 전열로켓, 정전기 로켓 그리고 전자기 로켓으로 분류할 수 있다. 본 연구에서 다루어지고 있는 로켓은 전열로켓으로서 일반적으로 전기저항제트 혹은 아크제트로 불려진다. 이러한 아크제트는 화학로켓보다 비추력에 있어서 더욱 높은 값을 가지고 있다고 일반적으로 알려져 있다. 따라서 아크제트를 실험이 아닌 전산해석을 이용해서 그 성능을 예측하고 평가될 수 있다면 본 연구의 큰 소득이라고 할 수 있다. 물론 이러한 아크를 포함한 유동해석은 여러 가지가 있다. 예로서 자성유체 유동장과 고전압 방전의 arc 모델링이 있을 수 있으며 여기서 저압/저속/자기장 내에서의 자성 유동장은 전자기적 정보와 비압축성 유동 해석, 그리고 전자들의 이동 현상에 대한 복합 현상이며, 고전압의 arc 모델링은 주위 고속, 고온의 주위에 대한 압축성 유동장

-
- 2) 부산대학교 항공우주공학과 대학원 (609-735 부산시 금정구 장전동 산 30번지)
 - 2) 부산대학교 항공우주공학과 교수 (609-735 부산시 금정구 장전동 산 30번지)
 - 3) 부산대학교 항공우주공학과 교수 (609-735 부산시 금정구 장전동 산 30번지)



과 전기적인 정보를 동시에 공유하는 현상이고, 고압의 arc 방전에 의해 유도되는 고속, 고온의 유동장을 이용한 고속 추진원리 해석은 arc 모델과 함께 유동장의 특징에 의한 분자의 dissociation에 따른 화학 반응과 ionization 현상이라 할 수 있다. 이들 모든 유동은 공통적으로 비압축성/초음속/극초음속 유동장의 물리적 특성과 전산기법, 전자기적, 그리고 전기적인 arc 방전 특성과 모델 연구를 위한 복합적인 학제간 연구가 필요하다.

외국의 경우 arcjet을 이용한 고속 추진 분야는 선진국에서도 연구가 활발하게 이루어지고 있으나 국방 및 자국의 이익에 크게 연관되어 있어 자료가 국외로 유출되지 않고 있다. 그리고 전자기장에서의 유동해석이나 고압 방전을 이용한 연구는 최근 fusion 에너지 연구를 중심으로 한 Lawrence Livermore 연구소에서 시행되고 있으며, 영국과 일본에서 고압 방전 시스템을 이용한 회로 차단기 연구를 통하여 이루어지고 있다. 그러나 외국의 경우도 유체역학적 해석에 의한 연구는 최근 들어서야 시도되고 있으며, 국내에서는 아크 모델링에 대한 연구가 계속적으로 수행되고 있다. 그 외에 산업체에서 실질적으로 적용할 수 있는 분야는 반도체 특성을 이용한 차세대 TV중의 하나인 plasma display 연구와 또한 자동차의 경우 전자식 충격흡수기 등의 응용에 적용될 수 있다.

본 연구의 대상인 DC 아크제트 추력기는 지구정지위성의 자세제어에 이용되는 전열추력기로서 이러한 추력기의 개발은 물리적인 복잡성 때문에 경험적이고 직관적인 요소가 많이 포함된다.

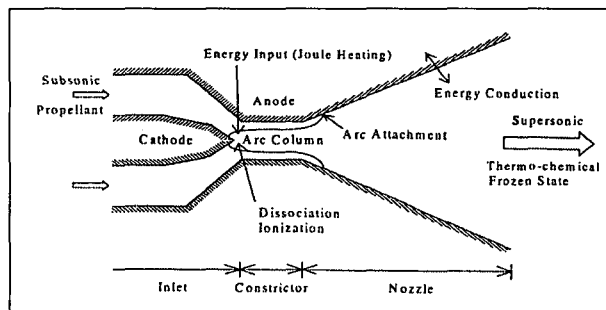


Fig. 1 Schematic of Arcjet flow

Fig. 1은 대략적인 아크제트 추력기의 형상이다. 추진제로는 질소가 사용되었으며 Cathode와 Anode의 분포를 볼 수가 있다. 연구수행을 위해 압축성 유체해석을 위하여 개발되어 있는 유동해석코드에 기초하여, 아크모델링을 포함하는 열가스 유동을 전산유체를 이용해 해석하였다.

2. 아크 발생기구의 모델링 및 접근 방법

일반적으로 아크는 Cathode tip에서 발생하며, Constrictor통해서 확대되고, 확대노즐부분에서 부착된다. 기체는 Ohm 가열에 의해서 가열되고 열에너지가 노즐의 확장을 통해서 운동에너지로 변환된다. 결국 그러한 운동에너지가 추력을 만

들게 한다. 환언하면 두 전극사이에는 큰 전위차가 발생하며, 이로 인해, 기체 중에 존재하는 자유전자는 전극 사이에 전류를 발생시킨다. 형성된 전류는 Ohm의 원리에 의해 열을 발생시키며, 열 발생은 기체 분자의 화학적 해리를 가져온다. 이 경우 기체 분자의 해리는 상당한 양의 열을 흡수하는 역할을 하지만, 아크 가열에 온도 증가는 20,000K를 넘으므로, 화학적 해리에 의한 열 손실은 Ohm 가열에 의한 열량에 비해서는 작은 양에 해당한다. 계속되는 Ohm 가열은 해리된 기체의 이온화를 촉진시키며, 유체는 플라즈마 상태가 된다. 이런 상태가 된 기체의 전기 전도도는 급속이 증가하여 절연 특성을 상실하게 되며, 전기 전도도의 증가는 Ohm 가열을 더욱 가속시켜 결국 상당한 양의 열 발생을 가져온다. 한편, 기체가 고온의 상태가 되면, 입자의 내부 에너지 준위가 크게 높아지고 상당한 양의 에너지를 복사에너지의 형태로 방출하게 된다. 따라서 복사 방출에 의한 에너지의 손실은 Ohm 가열에 의한 가열과 균형을 이루게 되어, 지속적인 가열에 의하여 온도가 무한히 증가하는 것을 방지한다. 한편 위성이 희박기체영역에 머물고 있기 때문에 노즐이 개방된 경우, 외부와의 압력 차이에 의하여 순간 최대 속도가 음속의 8배 이상이 되는 고속의 유동을 발생시킨다. 따라서 아크제트 추력기내의 아크 유동을 해석하기 위해서는 고속 압축성 유동의 해석 기법과 아크의 발생과정에 대한 모델링을 결합하여 해석하는 해석 코드를 개발하여야 한다.

본 연구에서는 열가스 해석의 일차적인 순서로서, 기존에 보유하고 있는 압축성 비점성 유동장의 해석 코드에 기초하여, 열발생의 기본 메커니즘인 전기장의 해석과 Ohm 가열에 의한 아크 형성 및 열 발생 과정을 해석하였다.

3. 지배 방정식

아크 방전에 의한 플라즈마 발생과정 및 열발생을 고려하는 유동 해석을 위한 지배 방정식들이 결합된 벡터 식의 형태로 정리하여 보면 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{1}{y} H = W \tag{1}$$

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e+p)u \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho vw \\ \rho v^2 \\ (e+p)v \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ S_{ohm} \end{bmatrix}$$

만약, 전기전도계수가 상수이라면, 포텐셜 ϕ 의 값은 유동장에 영향을 받지 않게 되어 각 시간 단계에서 해석할 필요가 없지만, 본 연구에서 고려하는 아크 유동장의 경우, 온도, 압력의 함수인 전기 전도계수 $\sigma = \sigma(T, P)$ 를 통하여 유동장과 결합되어 있으므로, 각 시간 단계에서 위의 방정식을 해석하여야 한다. Ohm 가열을 해석하기 위해서는 Maxwell 방정식을 별도로 해석하여야 하며,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left(y \sigma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0 \tag{2}$$

스칼라 함수인 ϕ 의 구배인 전기장 E 로부터 Ohm 가열을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_{ohm} = \sigma(E \cdot E) = \sigma |E|^2 \tag{3}$$



이온화 과정에 수반되는 복사 해석을 위해서는 다음의 복사 강도 I 에 대한 방정식을 추가적으로 해석하여야 하나 본 연구에서는 해석하지 않았다.

유한 체적법을 이용하여 지배 방정식을 차분하고 3차의 공간 정확도를 가지는 MUSCL과 TVD 성질을 위해 minmod 제한자를 사용하였다. 그리고 시간 적분은 완전 내재적 기법인 LU-SGS(Lower-Upper Symmetric Gauss Seidal)기법을 이용하였다.

4. 해석 결과 및 분석

Fig. 2의 격자에서 전체적인 형상을 확대칭으로 가정하였으며, 반평면에서 구성한 계산 격자이다. 질소의 비열비는 1.4, 유동 경계 조건으로써는 좌측을 고압부, 우측을 저압부로 놓았다. 유동 조건으로는 좌측 유입부의 마하수가 0.3, 전극 직경에 기준한 레이놀즈수가 1×10^4 , 노즐목부분과 출구의 면적비가 대략 200배가 되기 때문에 초기 입출구 압력비를 10000로 가정, 유동이 발달되게 한 후 모든 변수를 외삽하는 초음속 유출류 경계 조건을 부여하였고 모든 유동 변수는 입구에서의 값으로 무차원화 된 값을 이용하였다. 전기장의 해석을 위하여 좌측 전극을 Anode, 우측 전극을 Cathode로 가정, 각 전극에서 무차원화 된 전기 포텐셜의 값을 각각 1.0 과 0.0을 경계 조건으로 이용하였다. 양 전극사이에서는 1×10^3 A의 전류가 흐르는 것으로 가정하였으며, 유체의 전기 전도도는 기준 온도(298.15K), 기준 압력(1기압)에서 $1.5 \times 10^{-4} / \text{Ohm} \cdot \text{cm}$ 의 값을 가지고, 전체 유동에서 상수로 가정하였다.

4.1 냉가스 해석(비점성)

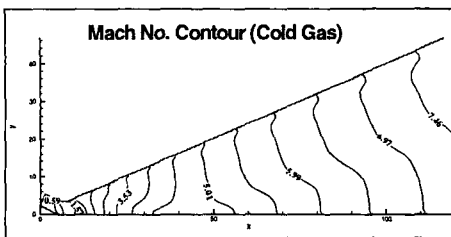


Fig. 2

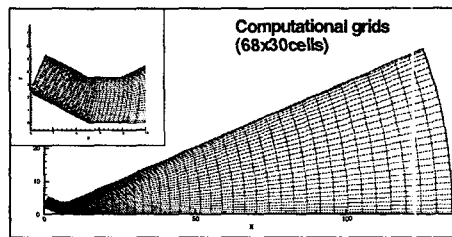


Fig. 3

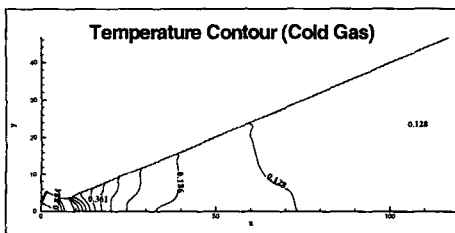


Fig. 4

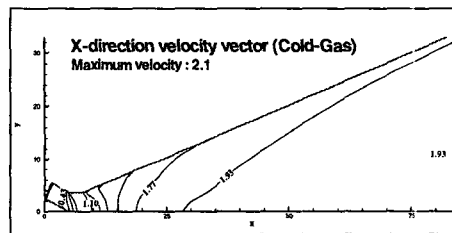


Fig. 5

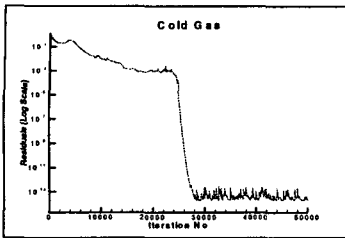


Fig. 6

냉가스 해석 결과에서는 챔버에서 나온 유동이 노즐 목에서 초음속 유동으로 가속되어 출구에서는 마하수가 7.89에 이르고, 출구/챔버 압력비가 0.006까지 증가했음을 알 수 있다.

4.2 정상 상태의 열가스 해석(비점성)

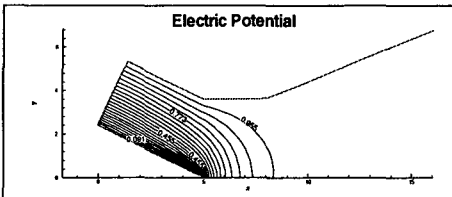


Fig. 7

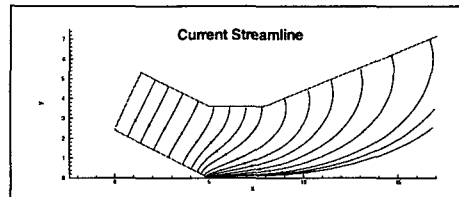


Fig. 8

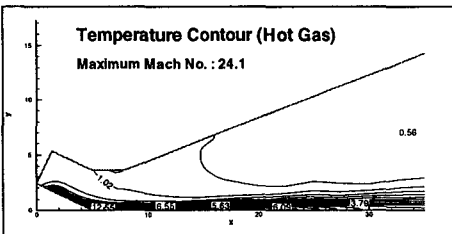


Fig. 9

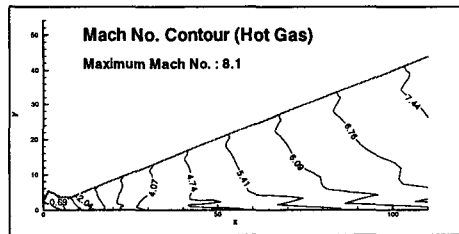


Fig. 10

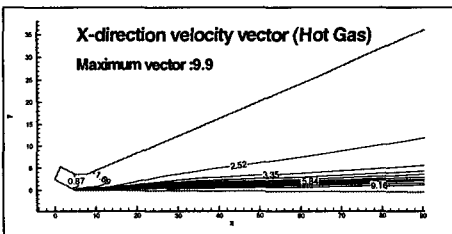


Fig. 11

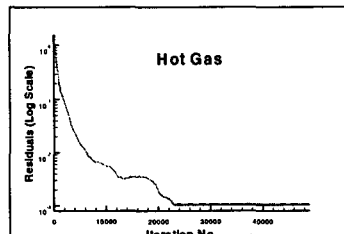


Fig. 12

열가스 해석 결과에서 첫 번째 그림은 등 포텐셜 선도, 두 번째 그림은 전기 유선을 도시한 것으로 전류의 흐름 방향을 알 수 있다. 전류의 분포로부터 얻어지는 Ohm 가열에 의한 온도 분포에서, Cathode의 tip부근에서 온도가 초기 온도의 24배(초기온도를 300K로 가정)이상 상승한 것을 알 수 있다. 이 경우 온도상승은 물리적으로 과도한 양이지만 이러한 상승은 본 모델링에서 Ohm가열에 의



한 지속적인 열발생만 고려하였기 때문이다. 따라서 복사 가열에 의한 열손실을 고려하는 경우 물리적으로 타당한 정도의 온도 추정이 가능하리라고 본다. 유동장의 온도가 매우 높아져서 음속이 커져 버리는 결과가 발생하지만 Fig11에서와 같이 올라간 온도만큼 속도가 더욱 크게 증가해서 마하수에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 하지만 Fig10과 같이 하단부의 온도 구배가 급격하기 때문에 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고 수렴성은 냉가스의 해석보다 떨어지는 것을 알 수 있었다.

5. 향후 연구 방향

본 연구로부터 전기장의 해석과 연계된 열 유동의 해석 코드를 구성하였으며, 해석 결과로부터 아크제트 추력기 내부에서와 같은 아크 유동의 해석이 가능함을 확인하였다. 그러나 본 연구의 결과로부터 정량적인 예측을 하기는 곤란한 것으로 사료되며, 실측치와 비교할 수 있는 정량적 해석을 위해서는 차기 연구에 로렌쯔 힘과 복사 열손실, 화학반응, 플라즈마 모델링을 적용시켜야 할 것이다.

* 후기 : 『이 논문은 2000년도 두뇌한국21사업 핵심분야에서 지원받아 수행된 연구임』

참고문헌

- [1] Shigeru Kuchi-ishi and Mishio Nishida, " Numerical Simulation of a Nitrogen Arcjet Thruster", Space Transportation, ISAS January 13-14, (1999).
- [2] 한국전기연구소, "아크를 포함한 차단부의 가스 유동 해석 프로그램 개발, 최종보고서," 과학 기술처, (1995).
- [3] X. Li and Q. Wang, "Numerical Analysis of Flow Field and the Dynamic Properties of Arc in the Interrupting Chamber of an SF6 Puffer Circuit Breaker," IEEE Transection of Plasma Science, Vol. 25 No. 5, Oct (1997)., pp.962-985
- [4] X. D. Zhang, J. Y. Trepanier and R. Camarero, "Numerical Simulation of a 2kA Convection-Stabilized Nitrogen Arc using FCD Tools," J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 30, (1997), pp.3240-3252.
- [5] Choi, J.-Y., Jeung, I.-S. and Yoon, Y., "Computational Fluid Dynamics Algorithms for Unsteady Shock-Induced Combustion Part I: Validation Study," AIAA Journal, Vol. 38 No 5, May (2000), in press.
- [6] T. Fujiwara, T. Fukui and F. Yonezawa, "A Mode of Laser Propulsion-Axisymmetric Laser-Supported Detonation," AIAA Paper 94-0052, (1994).
- [7] K. A. Hoffmann, "Computational Fluid Dynamics for Engineers, Part 1," Engineering Education System, (1993).