

이온화를 고려한 Arcjet 추력기의 화학 평형 유동 및 성능해석

신재렬* · 오세종** · 최정열***

Chemical Equilibrium Flow and Performance Analysis of the Arcjet Thruster with Ionization Effects

Jae-Ryul Shin*, Se-Jong Oh** and Jeong-Yeol Choi***

ABSTRACT

The computational fluid dynamic analysis has been conducted for the thermo-chemical flow field in an arcjet thruster with mono-propellant hydrazine (N_2H_4) as a working fluid. Coupled Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations and Maxwell equations were used to account for the Ohm heating and Lorentz forces. Ionization and thermal radiation effects were also incorporated to the fluid dynamic equations by assuming infinitely-fast reactions and optically thick media. In addition to the thermo-physical understandings of the flow field inside the arcjet thruster, results shows that performance indices are improved by amount of 20% in thrust and 70% in specific impulse with the 0.6kW are heating.

초 록

하이드라진을 추진제로 쓰는 아크젯 추력기 내의 열화학적 유동장을 전산유체를 이용해 해석하였다. Ohm가 열 및 Lorentz 힘을 고려하기 위하여 Maxwell 방정식과 연계된 RANS 방정식을 이용하였으며, 매우 빠른 반응 및 광학적으로 두꺼운 매질을 가정하여 이온화와 열복사를 해석에 포함하였다. 해석의 결과는 아크젯 추력기 내부 유동의 열-물리적 이해와 더불어 0.6 kW 가열에 의하여 하였을 때 추력과 비추력이 각각 20%와 70%가 향상됨을 보여주었다.

1. 서 론

아크젯 추력기는 Telstar-4, Satcom-GE 그리고 무궁화호 3호 등의 위성에서 북/남 위치유지(North South Station Keeping)등의 임무에 이용되며,[1] 작

동 구성이 단순하고 비추력이 높아 가까운 미래에 주된 우주 추진 기관으로 이용될 수 있을 것으로 보인다. 특히 연소특성과 저장성이 좋은 하이드라진(N_2H_4)을 추진제로 이용할 경우, 기존 단일 추진시스템과의 겸용이 가능한 이원추진 시스템 또는 복합 추진 시스템으로 이용할 수 있는 장점이 있다.

아크젯은 전기방전을 통해 추진제를 가열하여 노즐을 통해 가속시켜 추력을 얻는 간단한 작동방식을 가진다. 이때 전기 아크 가열의 역할은 추진제를 가

* 부산대학교 대학원 항공우주공학과

** 부산대학교 항공우주공학과

*** 부산대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail : aerochoi@pusan.ac.kr

열하는 것 뿐 아니라 플라즈마 상태로 이온화 된 추진체를 Lorentz 힘을 이용하여 가속시키는 부가적인 역할을 한다. 본 연구에서는 1 kW 급 아크젯 추력기 연구를 위해 압축성 유체 해석을 위해 개발된 해석코드에 기초하여 화학 평형에 기초한 이온화 모델, 아크모델 및 열복사모델을 포함하는 가스 유동 해석을 수행하여 성능을 평가하는 기초 연구를 수행하였다.

2. Arcjet 유동장의 모델링

2.1 유동장의 지배방정식과 해석 기법

본 연구에서 고려한 Navier-Stokes 방정식을 축대칭 (x, r) 좌표계에서 벡터형으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} + \alpha \mathbf{H} = \mathbf{W} \quad (1)$$

$$\mathbf{Q} = [\rho, \rho u, \rho v, e]^T, \quad \mathbf{W} = [0, F_r, F_y, S_{ohm}]^T \quad (2)$$

여기에서 \mathbf{Q} 는 보존변수의 순서쌍이며, 각 방향의 점성 및 비 점성 플럭스 벡터 \mathbf{F} , \mathbf{G} 와 축 대칭항 \mathbf{H} 는 보존변수의 함수이다. 그리고 \mathbf{W} 는 전자기장의 생성항 이다. 그리고 난류모델로는 Baldwin-Lomax 의 대수적 모델을 이용하였다.

유동장의 방정식의 공간 차분에는 Roe의 근사 Riemann 해법과 MUSCL 외삽에 기초한 3차의 TVD 해법을 공간 차분에 이용되었으며, 시간 적분에 기초한 반복 해법으로써, LU-SCS 해법을 이용하였다.

2.2 Arc 모델 및 복사 모델

Maxwell 방정식의 형태로 표현이 되는 전기장은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left(y \sigma \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

스칼라 함수인 Φ 의 구배인 전기장 \mathbf{E} 로부터 Lorentz 힘은 전기장을 적분한 자속밀도로부터 구하며, Ohm 가열은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_{ohm} = \sigma (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}) = \sigma |\mathbf{E}|^2 \quad (4)$$

Rosseland의 평균흡수계수를 이용한 복사 플럭스는 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

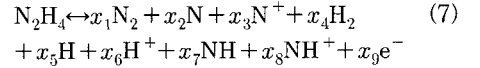
$$q_r = -\frac{16}{3} \sigma_{sb} T^3 \frac{1}{\alpha_R} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (5)$$

전체 열 플럭스는 복사와 전도가 결합된 형태로 다음과 같다.

$$q = q_r + q_c = -\left(\frac{16\sigma_{sb}T^3}{3\alpha_R} + k_c \right) \nabla T \quad (6)$$

2.3 화학평형해석

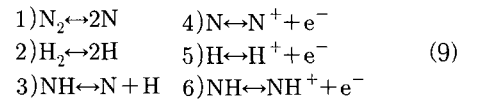
화학평형 해석에는 평형상수를 이용하는 방법을 택하였다. 연소실에서 분해가 완전히 이루어짐을 가정하고, 하이드라진 분해 결과의 생성물을 고려한 화학 반응식은 다음과 같다.



각 미지수들은 각 원소 성분의 보존 원리로부터 물분을 정의식과 물분율에 대한 일차함수의 비인 성분비식 그리고 전자에 대한 성분비식 등 3개의 선형 대수 방정식과

$$\sum_{k=1}^{ns} x_k = 1, R_{\text{H/N}} = 2, R_{\text{e}^-/\text{()}} = 1 \quad (8)$$

성분에 대한 생성 반응을 가정하여, 6개의 화학 평형식으로 구할 수 있다.



$$\prod_{k=1}^{ns} x_k^{(\nu_{r,k} - \nu_{i,k})} = K_p^r(T) \cdot p^{-\Delta \sum_{k=1}^{ns} (\nu_{r,k} - \nu_{i,k})}, \quad r = 1, \dots, 6 \quad (10)$$

온도와 화학평형의 계산에 필요한 열역학 데이터로는 NASA Polynomial Fit를 이용하였다.[2]

3. 해석 결과 및 분석

3.1 계산조건 및 격자구성

아크젯 추력기의 형태는 노즐목에 대한 출구 면적 비는 89, 노즐 목의 반지름은 0.682mm 그리고 전체 길이는 노즐 목직경의 27배 이다. Fig. 1은 80×40로 구성된 아크젯 추력기 격자계로 constrictor와 벽면으

로 격자를 조밀하게 설정하였다.

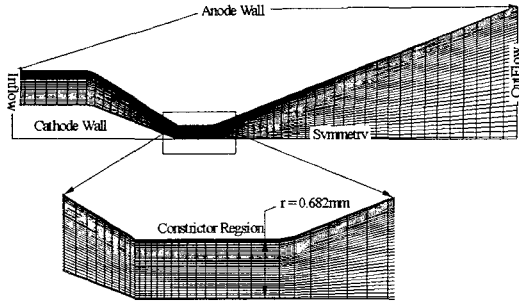


Fig. 1 Arcjet Thruster Grid System

화학평형결과와 NASA CEA II를 Table 1에서 비교하여 보았다[2]. 현재 연구의 결과 값과 NASA CEA II는 매우 유사한 결과를 보여 준다. Table 1의 결과를 연소실의 초기조건으로 적용하였다.

Table 1 Chemical Composition in Chamber

Temperature	1430K	Pressure	0.08MPa
Components	Present	NASA (CEA II)	
N ₂	3.3333-01	3.3333-01	
H ₂	6.6666-01	6.6666-01	
H	1.0000-05	1.0000-05	
N N ⁺ H ⁺ NH NH ⁺ e ⁻	0	0	

3.2 계산 결과 및 성능 해석

Figure 2는 추력기 내의 전기장의 분포와 온도 분포를 나타낸 그림으로써, 음극의 끝부분에서 전기 포텐셜의 구배가 크기 때문에 Ohm 가열이 크게 나타남을 알 수 있으며 결과적으로 이 부분에서 온도 상승이 크게 나타남을 알 수 있다.

Figure 3 과 4에서 전기 방전이 없는 경우와 있는 동결 유동과, 전기 방전이 있는 반응 유동에서 해리만을 고려한 경우와, 해리와 이온화를 모두 고려한 경우를 서로 다른 복사-전도 수에 대하여 비교하여 도시하였다. 전기방전이 없는 경우 유동장은 복사-전도수의 영향을 받지 않지만, 유동장에 전기방전이 일어나면, ohm가열에 의해 작업유체가 에너지를 받게 되고, 전기방전이 없는 동결유동에 비해 높은 온도와 빠른 속도로 노즐을 통해 팽창되어 나감을 알 수 있

으며, 유동장에 아크가 가해지면 노즐 축 중심에서 온도가 상승함에 따라 전반적으로 마하수가 낮아지는 것을 알 수 있다.

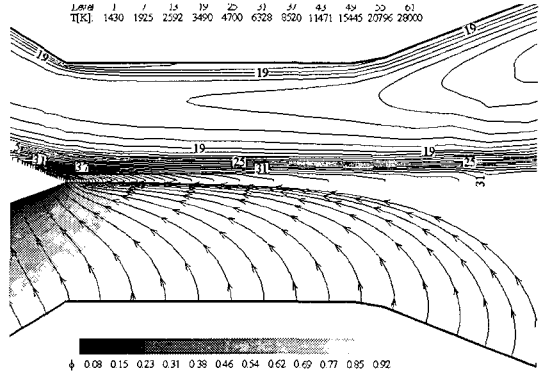


Fig. 2 Temperature and Electric Potential Fields with Current Lines

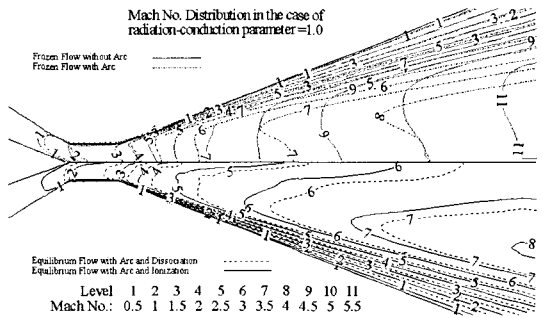


Fig. 3 Mach No. Distribution in the case of Radiation-Conduction Parameter=1.0

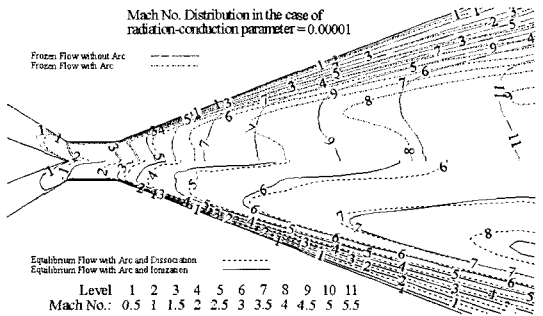


Fig. 4 Mach No. Distribution in the case of Radiation-Conduction Parameter=0.0001

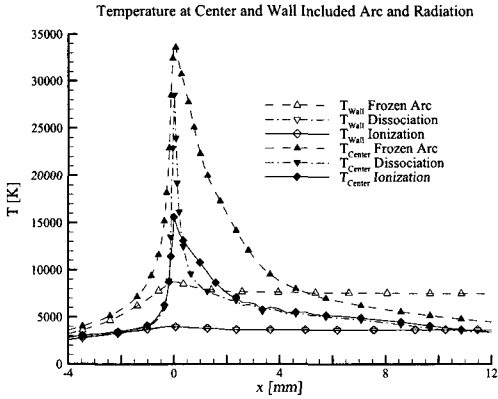


Fig. 5 Temperature at Wall and Axial

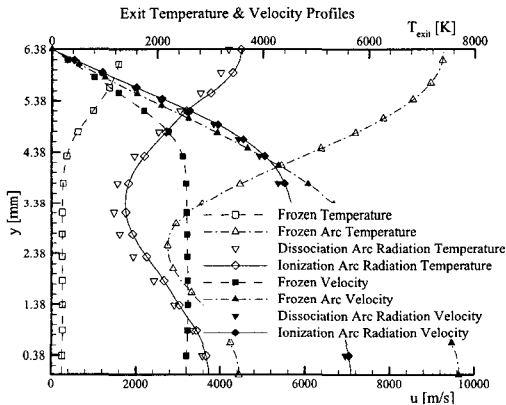


Fig. 6 Exit Temperature and Velocity Profiles

Figure 5는 추력기의 벽과 중심선에서의 온도 분포를 나타낸다. 해리와 이온화를 고려한 화학평형유동의 경우 전기방전을 고려한 동결유동에 비해 중심에서 20%와 57%의 온도 저하를 보였으며 두 경우의 벽면온도는 동결유동에 비해 50% 낮은 온도를 보여 준다. 이는 해리의 경우 동결유동에서 20%의 에너지를 소모를 하며, 이온화가 진행될 경우 해리경우에 약40%의 에너지를 더 소모하는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 출구에서의 온도와 축 방향 속도분포를 나타낸 것으로, 출구 축에서만 볼 경우 해리와 이온화를 고려한 화학평형유동이 비슷한 출구 온도와 속도분포를 보여준다. 위의 두 경우 동결유동에 비해 40%의 속도증가를 보이며, 전기방전을 고려한 동결유동에 비해서는 30% 낮은 속도를 보인다. 전기방전만 고려한 동결유동은

Ohm가열에 의한 열에너지가 운동에너지로 전환되는 경우이다. 따라서 전기방전에 의한 가열 및 이온화를 고려할 경우에 Table 2와 같이 추력이 20% 증가시키며 비추력은 70%를 상승시키는 효과를 가짐을 알 수 있다.

Table 2 Thrust and Impulse

Cases	Thrust [mN]	Impulse [sec]
Frozen	226.92	265.59
Frozen Arc	235.23	577.93
Dissociation Arc	270.39	435.35
Ionization Arc	270.59	445.37

4. 결론

1kW급 아크젯 추력기 설계를 위해 추진제의 이온화를 고려한 전산연구를 수행해 보았다. 이 기법은 RANS를, 전기적 아크 (Maxwell Equation), 화학평형 반응, 열복사 (Rosseland 근사)과 난류효과 (Baldwin-Lomax Model)을 포함한다. Maxwell 방정식으로부터 Lorentz 힘과 Ohm의 가열을 고려하였다. 해석 결과, 이온화를 고려할 경우 동결유동에 비해 57% 온도저하가 일어나며, 이는 추진제의 이온화 및 해리에 에너지가 이용된 결과이다. 간단한 전기방전 가열 메카니즘을 가진 추력기의 성능은 동결유동에 비해 이온화를 고려한 화학평형유동에서 추력은 20%, 비추력은 70%정도 성능이 향상됨을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 박용식, 박봉규, 김정수, "정지궤도 통신위성의 추진시스템 개념설계연구," 항공우주기술, 제1권, 제5호, pp. 55-64
2. McBride, B. j., and Gordon, S., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Application," NASA RP 1311, Jun 1996
3. Shin, J. R., Oh, S. J. Oh and Choi, J.-Y., "The Analysis of Arcjet Thruster Flow Field with Chemical Equilibrium and Thermal Radiation," *CFD Journal*, Vol. 13, No. 4, 2005, pp. 656-664.