

세그먼트 아크히터 내부에서 공기와 아르곤 기체의 혼합 현상에 대한 연구

이정일*, 정가람**, 김규홍***

Investigation of Separated Injection of Air and Argon in Segmented Constrictor Type Arc Heaters

Jeong-II Lee*, Garam Jeong** and Kyu-Hong Kim***

Key Words : 아크젯 풍동; 아크히터; ARCFLO4 코드

Abstract

The existing computer code to solve the air flow in a segmented constrictor-type arc-heated wind tunnel named ARCFLO4 is improved to accept an air-argon mixture as the working gas and to consider the separated injection of air and argon. The new version of the code is used to calculate the flows in the Aerodynamic Heating Facility of NASA Ames Research Center where argon concentration is relatively high. The calculation shows that argon tends to increase the diameter of the arc-column, increase ionization fraction, decrease thermal efficiency of the arc-heater, and push the ratio of the centerline-to-average enthalpy toward unity. The calculated operating characteristics of the arc-heater agree well with the experimental data.

1. 서론

아크젯(Arcjet) 풍동은 고온, 고압의 환경을 수 십분 이상 유지할 수 있기 때문에, 지구재돌입 비행체의 열보호시스템(Thermal Protection System) 연구를 위한 가장 적합한 풍동으로 여겨지고 있다. 아크젯 풍동의 주요 구성요소 중에서 아크히터(Arc Heater)는 아크 가열을 이용하여 높은 엔탈피 유동을 만들어 내는 장치이다. 아크히터 내부에서는 복사와 강한 난류혼합에 의한 복잡한 열전달 현상이 발생하여 그 유동을 실험적으로 분석하기 어렵기 때문에 수치적으로 분석하려는 시도가 꾸준히 진행되어왔다.

1970년대에 Nicolet 등이 복사선의 자기 흡수를 표현할 수 있는 2-밴드(Two-Band) 복사모델과 혼합길이(Mixing Length) 난류모델을 사용하여, ARCFLO 코드를 개발했다. 이 코드는 아크히터의 작동 특성을 실제와 비슷하게 예측했지만 포물선형 Navier-Stokes 방정식을 사용하기 때문에 실험으로 얻어진 초기 조건이 필요하였다. 이를 해결하기 위해 김규홍 등[1]은 쌍곡선형 Navier-Stokes 방정식을 이용한 ARCFLO2 코드를 개발하였다. ARCFLO2 코드는 ARCFLO 코드와 마찬가지로 2-밴드 복사 모델과 Cebeci-Smith 대수 난류 모델을 사용하였고, 정확한 계산을 위해 부가점성(Additional Viscosity)이라는 수치 모델을 도입하였다. 그러나 ARCFLO2 코드는 여러 아크히터의 다양한 유동 조건에서 충분한 정확도를 보장하지 못했다.

본 연구자들은 과거 연구자들의 성과를 바탕으로 2 방정식 난류모델과 3-밴드 복사모델을 사용한 ARCFLO4 코드를 개발하여, 다양한 아크히터의 유동을 정확하게 해석하였다[2]. 그러나

ARCFLO4 코드는 공기 유동만을 해석할 수 있기 때문에, 낮은 질량유동율에서 엔탈피의 정확성을 보장하지 못하는 단점을 가지고 있다. 일반적으로 아크히터의 작동 기체는 공기지만, 고온의 기체로부터 전극을 보호하기 위해서 소량의 아르곤을 전극 표면에 주입시킨다. 대부분의 아크히터 작동 환경에서 아르곤 양이 공기 양에 비해 작기 때문에 계산에서는 이를 무시하였다. 최근 본 연구자들은 이런 단점을 보완하기 위해서, 작동 기체를 일정 비율의 공기와 아르곤의 혼합 기체로 간주하여 유동 해석을 수행하였으며, 아르곤 비율이 높은 아크히터 작동환경에서 정확도를 향상시켰다[3].

본 연구는 전극으로부터 유입된 아르곤 기체가 아크히터 유동에 미치는 영향에 초점을 맞추었다. 전극 표면에서 유입되는 소량의 아르곤과 컨스트릭터에서 유입되는 공기는 혼합되는 과정을 거치게 된다. 과거의 연구에서는 아크히터 내부에서 공기와 아르곤의 비율은 일정하다고 가정하였지만, 실제로는 모든 지점에서의 공기와 아르곤의 비율은 다를 것이다. 아크히터 유동을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 공기와 아르곤의 혼합 현상을 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 공기와 아르곤 기체의 혼합 유동을 계산하기 위해서, 공기와 아르곤의 질량보존 방정식을 작동기체에 대한 지배방정식에 결합하고, 열평형 상태를 가정 하에 아르곤-공기 혼합 비율에 따른 기체의 열역학 계수와 수송 계수들을 새로이 계산하여, NASA Ames 연구소 AHF(Aerodynamic Heating Facility) 아크히터의 유동 해석을 수행하였다.

2. 지배방정식 및 수치 모델

그림 1은 세그먼트 아크히터(Segmented Constrictor Type Arc Heater)의 형상을 보여준다. 세그먼트 아크히터는 양전극판, 컨스

* 서울대학교 기계항공공학부, snow0730@empal.com

** 서울대학교 기계항공공학부, sadadjr7@snu.ac.kr

*** 서울대학교 기계항공공학부, aerocfd1@snu.ac.kr

트릭터(Constrictor), 음전극관, 노즐로 구성되어 있다. 대부분의 작동기체(공기)는 컨스트릭터 벽면에서 유입되고, 전극을 보호하기 위한 소량의 아르곤이 두 전극 표면에서 유입된다. 공기와 아르곤은 혼합 과정을 거치면서 노즐을 통해 시험부로 빠져나간다. 컨스트릭터 안에서 아크는 두 전극 사이에서 발생하며, 코어 부근의 기체를 직접 가열시킨다. 아크에 의해 발생한 열은 복사와 난류혼합으로 인해 주변 기체로 전달되며, 복사에 의해 컨스트릭터 벽면에 전달된 열은 냉각 장치에 의해 흡수된다.

2.1 지배방정식

아크히터 내부 유동을 계산하기 위해서 줄가열량과 복사 열 전달항을 포함한 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 공기와 아르곤의 혼합비율을 계산하기 위해서 공기와 아르곤의 질량보존 방정식들을 추가하였다. 아르곤은 불활성 기체로 공기와 화학 반응을 일으키지 않으므로 질량보존 방정식에 생성항은 존재하지 않는다.

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

$$Q = \begin{bmatrix} \rho_{air} \\ \rho_{argon} \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e_t \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -j \cdot E \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$E = \begin{bmatrix} \rho_{air} u \\ \rho_{argon} u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (\rho e_t + p) u \end{bmatrix}, E_v = \begin{bmatrix} \rho D_{air} \frac{\partial c_{air}}{\partial x} \\ \rho D_{ar} \frac{\partial c_{ar}}{\partial x} \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} - q_{c,x} - q_{r,x} + q_{d,x} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$F = \begin{bmatrix} \rho_{air} v \\ \rho_{argon} v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (\rho e_t + p) v \end{bmatrix}, F_v = \begin{bmatrix} \rho D_{air} \frac{\partial c_{air}}{\partial y} \\ \rho D_{ar} \frac{\partial c_{ar}}{\partial y} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} - q_{c,y} - q_{r,y} + q_{d,y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$H = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} \rho_{air} v \\ \rho_{argon} v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (\rho e_t + p) v \end{bmatrix}, H_v = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} \rho D_{air} \frac{\partial c_{air}}{\partial y} \\ \rho D_{ar} \frac{\partial c_{ar}}{\partial y} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} - \tau_{\theta\theta} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} - q_{c,y} - q_{r,y} + q_{d,y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,

$$\tau_{xx} = \mu \left(\frac{4\partial u}{3\partial x} - \frac{2\partial v}{3\partial y} \right), \tau_{xy} = \mu \left(\frac{4\partial u}{3\partial y} + \frac{2\partial v}{3\partial x} \right) \quad (6)$$

$$\tau_{yy} = \mu \left(\frac{4\partial v}{3\partial y} - \frac{2\partial u}{3\partial x} \right), \tau_{\theta\theta} = -\frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{4}{3} \mu \frac{v}{y} \quad (7)$$

여기서, j 는 줄가열량, D 는 확산계수, q_r 은 복사열플럭스, q_d 는 확산에 의한 에너지 플럭스이다.

2.2 수치모델

아크히터 내부의 유동장은 화학적으로 평형이라고 가정하고, 기체의 화학종 구성비는 Gibbs 자유 에너지 최소화화에 의해 계산되었다. 화학종의 구성비와 각각의 화학종에 대한 열역학 데이터를 가지고 열역학 계수를 계산하였으며, 수송 계수는 Chapman-Enskog 방정식의 간략화 식을 토대로 계산되었다. 압력과 온도 등과 같은 열역학 계수와 점성, 열전도율, 전기전도도 같은 수송 계수는 직접 계산하여 표 형식으로 만들었으며, 중간 값은 수치적으로 내삽하여 사용하였다.

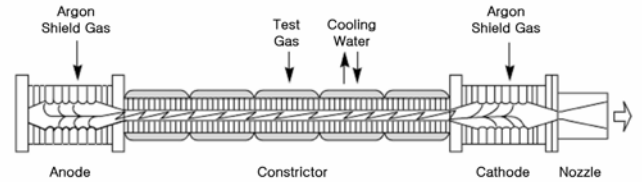


Fig. 1 Segmented constrictor type arc heater

줄가열은 음의 법칙을 이용하여 간단히 구했으며, 복사에 의한 열전달을 계산하기 위하여 열전달 복사에너지 방정식을 직접 풀 3-밴드 복사모델이 사용되었다. 3-밴드 모델은 아크히터 내부의 복사 현상을 정확하게 묘사하는 것으로 알려졌다. 난류 계산을 위해서는 난류의 대수 현상을 표현할 수 있고 혼합 길이를 직접 구할 필요가 없는 k-ε 난류 모델을 사용하였다. 과거의 연구에서 k-ε 난류 모델과 3-밴드 복사모델을 이용하여 아크히터의 유동을 정확하게 해석할 수 있음을 보였다[2].

3. 계산 결과

본 연구에서는 NASA Ames 연구소의 AHF 아크히터에 대한 유동 해석이 수행되었다. 계산 후, 아크히터 내부의 공기-아르곤 밀도비 분포를 비교하였으며, 온도와 엔탈피 등의 열역학적 변수들의 분포를 확인하였다. 그림 2는 반지름 방향으로 10배 늘린 AHF의 계산 격자이며, 전류는 1600 A이고 0.12 kg/s 공기와 0.03 kg/s의 아르곤이 각각 전극과 컨스트릭터 표면을 통해 유입된다.

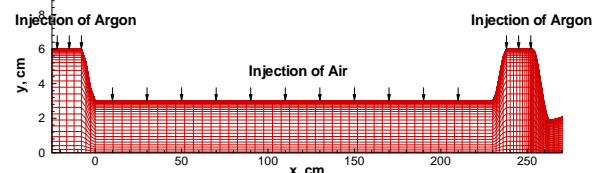


Fig.2 Grid system(97x50)

그림 3은 아크히터 내부의 유선을 보여준다. 양전극관에 유입된 0.015 kg/s의 아르곤 기체는 컨스트릭터 코어를 따라 흘러 노즐 밖으로 빠져나가며, 컨스트릭터 벽면에서 유입된 0.12 kg/s 공기는 코어 주변을 따라 흐른다. 음전극관에서 유입된 0.015 kg/s의 아르곤 기체는 음전극관과 노즐의 표면을 따라 흐른다.

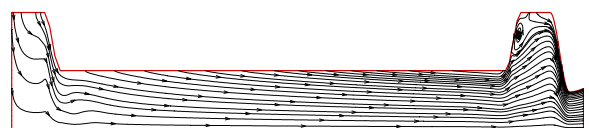
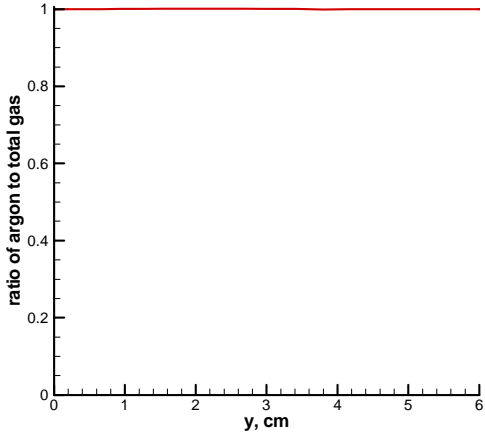
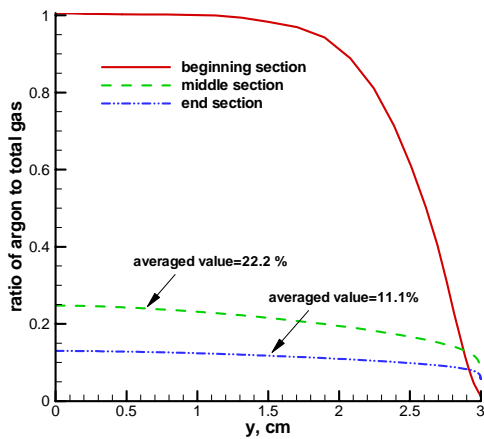


Fig. 3 Streamline

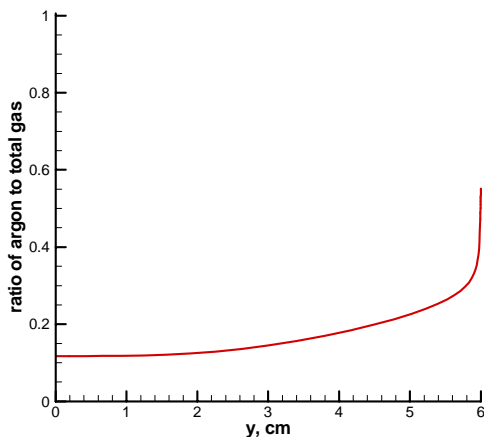
그림 4a는 양전극관 중간 단면에서 반지름 방향으로의 전체 기체에 대한 아르곤의 밀도비 분포를 보여준다. 그림에서 양전극관에서 기체는 모두 아르곤임을 알 수 있다. 그림 4b는 컨스트릭터 시작, 중간, 끝단면에서 반지름 방향으로의 전체 기체에 대한 아르곤의 밀도비 분포를 보여준다. 컨스트릭터 시작 단면에서 컨스트릭터 벽면으로부터 유입된 공기는 확산에 의해 양전



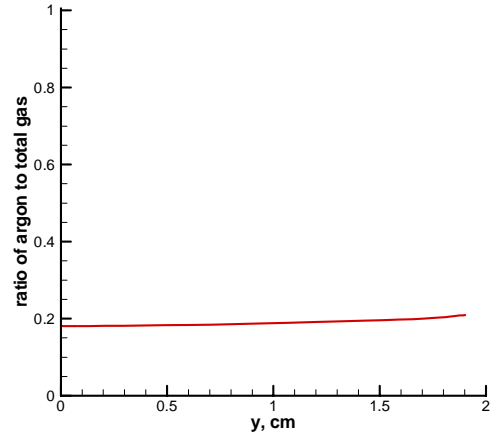
(a) ratio of argon in anode chamber



(b) ratio of argon in constrictor



(c) ratio of argon in cathode chamber



(d) ratio of argon at nozzle throat

Fig. 4 Ratio of argon to total working gas

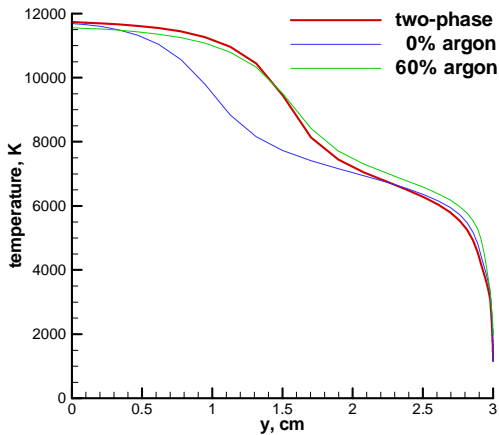
극관에서 유입된 아르곤과 섞이기 시작한다. 그러나 기체의 확산이 충분이 일어나지 않아, 공기는 벽면 근처에만 존재한다. 컨스트릭터 중간과 끝단면에서는 기체의 확산이 빠르게 일어나며, 전체 기체는 벽면을 제외한 많은 영역에서 일정 비율의 공기-아르곤 혼합기체 형태로 존재한다. 컨스트릭터 안에서 벽면을 통해 공기가 계속 유입되기 때문에 컨스트릭터 뒤쪽으로 갈수록 아르곤 비율은 낮아진다. 그림 4c는 음전극관 중간단면에서 반지름 방향으로의 전체 기체에 대한 아르곤의 밀도비 분포를 보여준다. 음전극관 표면에서는 보호기체(Shield Gas)인 아르곤이 유입되어, 컨스트릭터 표면으로부터 유입된 공기를 표면으로부터 밀어내며, 벽면 근처에서 아르곤의 비율은 증가한다. 그림 4d는 노즐목에서 반지름 방향으로의 전체 기체에 대한 아르곤의 밀도비 분포를 보여준다. 노즐 목에서는 기체의 확산이 빠르게 일어나, 작동기체는 모든 영역에서 일정 비율의 공기-아르곤 혼합기체 형태로 존재한다.

그림 5는 컨스트릭터 중간과 끝단면에서 반지름 방향으로의 온도 분포를 보여준다. 그림에서 각각의 최대 온도는 비슷하나 아르곤을 고려했을 때 고온 영역이 보다 많을 것을 알 수 있다. 확산을 고려한 계산 결과와 일정 비율의 공기-아르곤 혼합기체의 계산 결과는 비슷한 온도 분포를 보였다. 온도 구배가 완만한 곳을 아크의 두께라 정의하면 아르곤을 고려했을 때 아크 두께가 큰 것을 확인할 수 있다. 그림 6는 컨스트릭터 중간과 끝단면에서 반지름 방향으로의 엔탈피 분포를 보여준다. 아르곤의 비열은 공기에 비해 작기 때문에 아르곤의 비율이 클수록 엔탈피는 낮다. 확산 현상을 고려했을 때 컨스트릭터 앞쪽에서 아르곤 비율이 매우 크므로 가장 낮은 엔탈피를 가지지만, 컨스트릭터 뒤쪽으로 갈수록 공기의 비율이 증가하므로 엔탈피가 증가한다. 컨스트릭터 끝에서 확산을 고려했을 때의 아르곤 비율은 일정 비율의 공기-아르곤의 혼합기체의 아르곤 비율 보다 작기 때문에 높은 엔탈피를 보여준다. 그러나 음전극관을 통과하면서 아르곤이 새로이 유입되기 때문에 음전극관 이후에는 아르곤 비율이 비슷해지며, 그림 7과 같이 유사한 엔탈피를 분포를 가지게 되고 평균엔탈피에서 대한 중심 엔탈피의 비는 조금 작다.

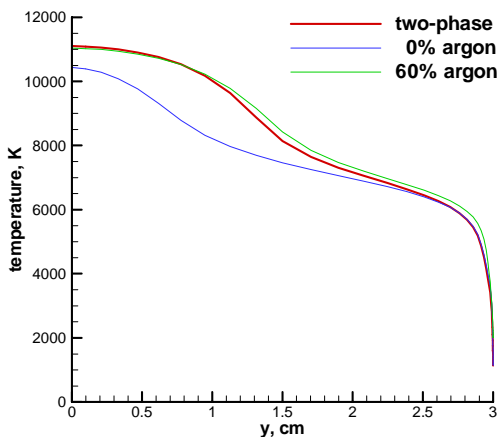
4. 결론

아크히터의 공기 유동을 해석하기 위하여 개발된 ARCFLO4

코드는 공기-아르곤의 혼합 기체뿐만 아니라 두체의 혼합현상을 해석하기 위해서 개선되었다. 개선된 ARCFLO4 코드는 NASA Ames 연구소의 AHF 아크히터 유동을 해석하는데 사용되어졌다. 계산 결과, 기체의 확산 작용에 의해 아크히터 내에서 공기-아르곤 비율이 변하는 것이 확인하였다. 따라서 과거에 연구된 공기-아르곤의 일정 비율을 가진 작동 기체 계산과는 다른 특징을 보였다. 아르곤 비율이 증가할수록 아크 두께는 작아졌으며 평균 엔탈피에서 대한 중심 엔탈피의 비도 작아졌다.

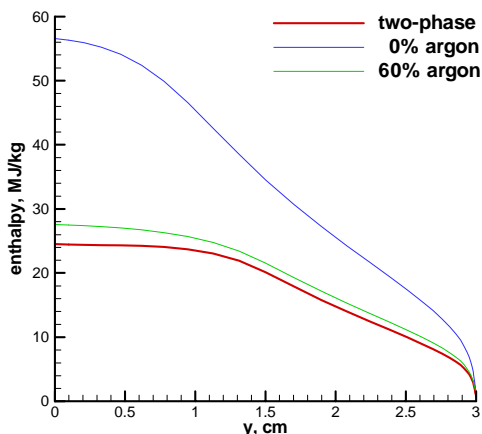


(a) middle section of constrictor

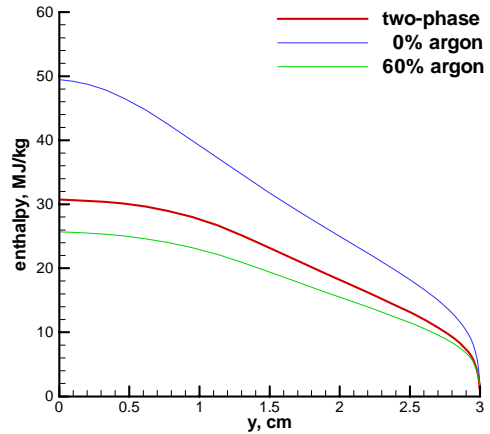


(a) end section of constrictor

Fig 5 Temperature distribution in constrictor



(a) middle section of constrictor



(a) end section of constrictor

Fig 6. Total enthalpy distribution in constrictor

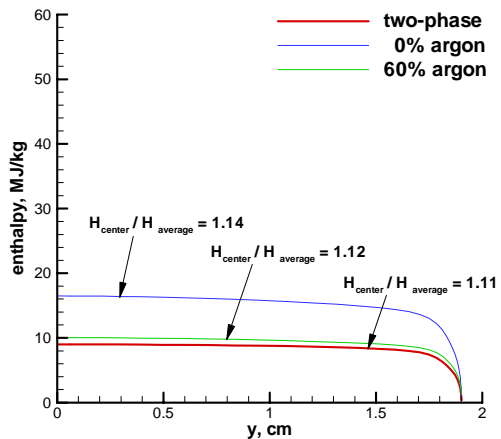


Fig. 7 Ratio of centerline enthalpy to mass averaged enthalpy

후 기

이 논문은 2007년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음. 본 연구는 한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅센터 (KSC-2007-S00-1015) 의 지원을 통해 수행되었음.

참고문헌

- [1] Kim, K. H., Rho, O. H., and Park, C., "Navier-Stokes Computation of Flows in Arc Heaters," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 14, No. 2, 2000, pp. 250-258.
- [2] Lee, J. I., Kim, C., and Kim, K. H., "Accurate Computations of Arc-heater Flows Using 2-equation Turbulent Models," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 21, No. 1, 2007, pp. 67-76.
- [3] Lee, J. I., Han, S. H., Kim, C., and Kim, K. H., "Analysis of Segmented Arc-Heater Flows with High Argon Concentration," Journal of Thermophysics and Heat Transfer accepted the publication in Jan. 2008.