論文

아크히터 내부의 난류 효과에 대한 고찰

이정일*, 김규홍**, 김종암**

Investigation of Turbulent Flow Effect in Segmented Arc Heater

Jeong-Il Lee*, Kyu-Hong Kim** and Chongam Kim**

ABSTRACT

Flows in segmented arc-heaters have been calculated for prediction of experimental operating condition or for analysis and design of arc-heater itself. Some researchers succeeded in calculating accurately inner flows of a arc-heater, but could not made mathematical models which satisfy various operating conditions for many arc-heaters. this study is forced on turbulence for the generality of mathematical model. Instead of algebraic turbulence models which are frequently used for calculating inner flow of arc-heater, two equation turbulent models are used. Prediction results agree well with experiment data and it was confirmed that $k-\varepsilon$ two equation turbulence model is appropriate for a flow in an arc heater throughout extensive numerical testing.

초 록

아크히터의 작동특성을 예측하고 아크히터 자체의 설계와 해석을 위해, 세그먼트 아크히터(segmented arc-heater)의 내부 유동을 계산하였다. 지금까지 몇몇 연구자들이 아크히터 내부 유동을 수학적으로 모델링하여 일부 아크히터의 내부 유동을 정확하게 계산하는데 성공하였지만, 다양한 아크히터의 여러 운용 조건을 모두 만족하는 수학적 모델을 완성하지 못했다. 본 연구에서는 수학적 모델링의 범용성 확보를 위해, 아크 히터 내부의 난류 유동에 중점을 두었다. 기존의 대수 난류 모델을 대신하여 세 개의 2방정식 난류를 사용하였으며, 계산 결과 $k-\varepsilon$ 난류 모델이 아크히터 내부의 유동을 모사하는데 적합하다는 것을 확인했으며, 난류가 아크히터 유동을 특성을 좌우하는 중요한 요소 중에 하나라는 것을 밝혔다.

Key Words : Arc-Jet Wind Tunnel(아크젯 풍동), Arc-Heater(아크히터), Plasma(플라즈마), Joule Heating(줄 가열), Radiation Model(복사 열전달 모델), Turbulence Model(난류 모델)

Ⅰ. 서 론

아크젯(arc jet) 풍동은 아크 가열을 이용하여 장시간 높은 엔탈피 유동 환경을 만들어 내는 실험 장치로서, 지상에서 공력가열 현상 연구를 위해 주로 사용되고 있다. 공력가열 현상 관련 연구는 많은 양의 에너지를 필요로 하기 때문에 운용비용이 매우 많이 드는 어려움이 있다. 이러한 비용의 많은 부분은 주어진 공력가열 환경을 정확히 구현하기 위한 풍동 운용 조건 세팅과정에서 발생하는데, 보다 경제적인 아크젯 풍동 운용을 위해 이러한 비생산적인 비용을 절감할 필요가 있다. 전산유체역학은 이러한 비생산적인 요소를 제거하는데 효율적으로 이용될 수 있는, 하

† 2004 년 5월 24일 접수 ~ 2005 년 3월 18일 심사완료
* 정회원, 서울대학교 항공우주공학과 대학원
** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부
연락저자, E-mail: chongam@snu.ac.kr
서울시 관악구 신림9동 산56-1번지

나의 실험 보조 도구로서 의미가 있다.

아크젯 풍동은 아크가열에 의해 높은 엔탈피 유동을 만들어내는 아크히터(arc-heater)와 전력 공급 장치, 냉각수를 공급해주는 주변 장치 그리고 측정장치 등으로 이루어져 있으며, 아크히터의 형식에 따라 여러 가지로 분류되어진다. 아크히터 내부의 기체는 아크 가열에 의해 이온과 자유 전자, 중성원자가 섞어 있는 플라즈마 상태이다. 이 때 아크의 에너지가 강한 복사 열전달과 난류 혼합에 의해 주변 기체에 전달되어 높은 엔탈피 유동이 발생된다.

Watson 등[1]은 처음으로 아크히터 내부의 유동을 계산하는 코드를 개발하였다. 줄가열(Joule heating) 모델과 광학적으로 성긴 복사 모델을 이용한 포물선형 축대칭 Navier-Stokes 방정식이 적용되었으며, 간단한 대수 난류 모델이 사용되었다. 그러나 개발된 코드는 실제 유동 현상을 정확히 모사하기에는 부족한 면이 많았다. 이어 Nicolet 등[2]이 복사선의 자기 흡수를 표현할 수 있는 two-band 복사모델과 혼합 길이의 크기를 수정한 난류모델을 사용하여, Waston 등의 코드를 개선했다. 이 코드는 ARCFLO라고 명명되어졌으며, 아크히터의 작동 특성을 실제와 비슷하게 예측했다. 이후 Sakai 등[3]은 ARCFLO 코드에서 two-band 복사 모델을 PRG 복사 모델로 바꾸고 난류 인자를 수정하여, 개선된 코드를 개발하였다. 그러나 이를 통해 얻어진 정확도는 ARCFLO 수준에서 크게 벗어나지 않았다. 비슷한 시기에 김규홍 등[5]은 ARCFLO 코드에서 사용된 포물선형 Navier- Stokes 방정식 대신에 쌍곡선형 Navier-Stokes 방정식을 이용한 코드를 개발하였다. 그들은 ARCFLO와 같은 two-band 복사 모델과 Cebeci- Smith 대수 난류 모델을 사용하였으며, 부가점성(additional viscosity)이라는 수치 모델을 도입하여 아크히터의 내부 유동을 기존의 다른 어떤 코드보다 정확하게 예측했다. 최근에는 Sakiai 등[4]이 쌍곡선형 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 자신들의 코드를 개선했다. 그들은 난류 모델을 그대로 유지하고 PRG 복사 모델을 three-band 복사 모델로 바꾸었다. 이 코드는 일부 아크히터에서 정확성을 확보하였지만 다른 여러 아크 히터에서는 정확한 결과를 얻지 못했다.

김규홍 등의 연구에서 그들은 난류에 관심을 두었다. 그들은 Cebeci-Smith 대수 난류 모델이 코어로부터 주위로의 열전달을 실제보다 작게 계산한다고 생각하였고, 이를 해결하기 위해 에너지 방정식의 난류 점성에 부가 점성을 더해 열전달을 강화시켰다. 그러지만 그들은 부가 점성의 의미를 물리적으로 정확하게 설명할 수 없었다. 그럼에도 불구하고, 부가점성의 도입으로 얻어진 정확성 향상은 유동장을 지배하는 요소들에 대한 새로운 고찰이 필요하다는 것을 말해준다. 즉, 지금까지 대부분의 연구는 복사 모델의 정확성에 초점을 맞추어 연구가 이루어 졌으나 난류에 대한 새로운 접근이 필요하다.

지금까지 아크히터 내부 유동 계산에 사용된 대수적 난류 모델은 간단하고 계산량이 적다는 장점이 있지만, 경험으로 얻어진 계수가 많으며 복잡하고 알려지지 않은 유동장에서는 정확성을 보장할 수 없다는 단점이 있다. 아크 히터 내부의 유동은 벽면을 통해 유입되는 기체로 인하여 난류의 생성과 성장이 벽면을 따라 지속적으로 이루어지고, 코어로부터 주변 기체로의 강한 열전달로 큰 온도 구배가 존재하는 복잡한 유동이다. 이러한 아크 히터 내부유동을 정확하게 해석하기 위해서는 난류 계산 시 경험적인 요소를 최소한으로 줄이고 지속적인 난류 생성과 성장을 표현할 수 있는 발전된 난류 모델이 필요하다.

본 연구에서는 2방정식 모델을 이용하여 경험적인 요소를 제거하여 코드의 범용성을 확보하고자 하였다. 코드를 검증하기 위해, 여러 가지 운용 조건에 따라 계산을 수행하였으며, 실험치와 잘 일치하는 결과를 얻었다.

II. 수학적 모델링

2.1 지배방정식

Fig. 1은 세그먼트 아크히터(segmented arc-heater)의 형상을 보여준다. 세크먼트 아크히터는 양전극관, 컨스트릭터(constrictor), 음전극관, 노즐로 구성되어 있다. 아크는 양전극관과 음전극관 사이에서 발생하며, 컨스트릭터 벽면을 통해 유입된 기체를 직접 가열시킨다. 아크에 의해 발생한 열은 복사와 난류혼합으로 인해 주변 기체로 전달되며, 복사에 의해 컨스트릭터 벽면에 전달된 열은 냉각 장치에 의해 흡수된다. 이런 현

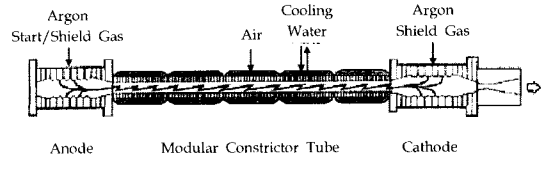

Fig. 8. Schematic of a segmented constrictor type arc-heated wind tunnel

상으로 인해 컨스트릭터 내부의 기체 온도는 코어 부근에서는 수만도 벽면에서는 수천도 까지 상승하고, 기체는 이온과 자유전자, 중성원자가 섞여있는 플라즈마 상태가 된다. 최종적으로 플라즈마 상태의 기체는 노즐을 통해 시험부로 빠져나간다.

아크히터 내부 유동을 계산하기 위해서 줄가열항과 복사 열전달항을 포함한 쌍곡선형 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 사용하였다. ARCFLO에서 사용한 포물선형 축대칭 Navier-Stokes 방정식은 해를 공간전진법으로 구하기 때문에, 계산을 위해서는 컨스트릭터 내부 압력 값을 미리 알아야 한다는 문제점을 가지고 있다. 반면에 쌍곡선형 Navier- Stokes 방정식은 시간전진법으로 해를 구하므로 컨스트릭터 내부의 압력을 미리 알 필요가 없으며, 초기조건으로 질량유동율과 전류만을 요구한다. 사용된 지배방정식 형태는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial y}+H=\left[\frac{\partial \boldsymbol{E}_v}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{F}_v}{\partial y}\right]+H_v+I \tag{1}$$

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho e_t\end{bmatrix},\ \boldsymbol{I}=\begin{bmatrix}0\\0\\0\\-j\cdot E\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}\rho u\\ \rho u^2+p\\ \rho uv\\ (\rho e_t+p)u\end{bmatrix},\ \boldsymbol{E}_v=\begin{bmatrix}0\\ \tau_{xx}\\ \tau_{xy}\\ u\tau_{xx}+v\tau_{xy}-q_{c,x}-q_{R,x}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix}\rho v\\ \rho uv\\ \rho v^2+p\\ (\rho e_t+p)v\end{bmatrix},\ \boldsymbol{F}_v=\begin{bmatrix}0\\ \tau_{xy}\\ \tau_{yy}\\ u\tau_{xy}+v\tau_{yy}-q_{c,y}-q_{R,y}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{H}=\frac{1}{y}\begin{bmatrix}\rho v\\ \rho uv\\ \rho v^2\\ (\rho e_t+p)v\end{bmatrix},\ \boldsymbol{H}_v=\frac{1}{y}\begin{bmatrix}0\\ \tau_{xy}\\ \tau_{yy}-\tau_{\theta\theta}\\ u\tau_{xy}+v\tau_{yy}-q_{c,y}-q_{R,y}\end{bmatrix}$$

여기서,

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

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

여기서, I 는 줄 가열량이고 q_R은 복사열 플럭스이다.

아크히터 내부의 유동장은 화학적으로 평형이라고 가정하였으며 상태방정식은 다음과 같다.

$$p=(\gamma-1)\rho e=(\gamma-1)\rho\left[e_t-\frac{1}{2}(u^2+v^2)\right] \tag{2}$$

여기서 γ는 등가 비열비(equivalent specific heat ratio)이며 밀도와 온도 또는 밀도와 압력과 같은 두개의 상태변수의 함수이다. 이 논문에서 압력과 온도 등과 같은 열역학적 상태량은 다항식 형태의 보정식으로 구했다[6]. 마찬가지로 충류 점성과 열전도율 등과 같은 수송 상태량도 다항식 형태의 보정식으로 구했으며[7], 수송 상태량의 온도범위는 500K~30000K, 압력범위는 10^{-4}~10^{2} 기압이다.

2.2 줄가열

일반적으로 줄가열(Joule heating)은 Maxwell 방정식을 직접 풀어서 얻어지는 값이지만 전류의 분포를 안다면 옴의 법칙을 이용하여 간단히 구할 수 있다. 컨스트릭터 벽면이 전기적으로 절연되어 있기 때문에, 본 연구에서는 컨스트릭터 내에서는 전류를 일정하게 놓았으며 그 값은 초기조건으로 주어졌다.

전류밀도 j는 다음과 같이 전기전도 계수 σ와 전압구배 E의 곱으로 구할 수 있다. 전기전도 계수 σ는 온도와 압력의 함수이며, 전압 구배는 반지름에 의존하지 않는다고 가정하였다.

$$j(x,y)=\sigma(x,y)\cdot E(x) \tag{4}$$

$$E(x)=\frac{j(x,y)}{\sigma(x,y)}=\frac{\int_0^R 2\pi y j(x,y)\,dy}{\int_0^R 2\pi y\sigma(x,y)\,dy}=\frac{I}{\int_0^R 2\pi y\sigma(x,y)\,dy} \tag{5}$$

여기서, 전류 I는 Kirchhoff 전류 보전 법칙으로부터

$$I=\int_0^R 2\pi y j(x,y)\,dy \tag{6}$$

이다.

결국 줄 가열은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$j(x,y)\cdot E(x)=\frac{I^2\sigma(x,y)}{\left[\int_0^R 2\pi y\sigma(x,y)\,dy\right]^2} \tag{7}$$

2.3 복사열전달 모델

복사열전항을 계산하기 위해서, 매질은 산란되지 않고, 기체는 광학적으로 짙고(gray), 컨스트릭터 벽면은 흑체이고, 복사량은 축방향으로 변하지 않는다고 가정하였다.

주파수 ν에 대한 복사 플럭스는 다음과 같이 주어진다.

$$q_\nu(y)=\int_\Omega I_\nu\cos\theta\,d\Omega \tag{8}$$

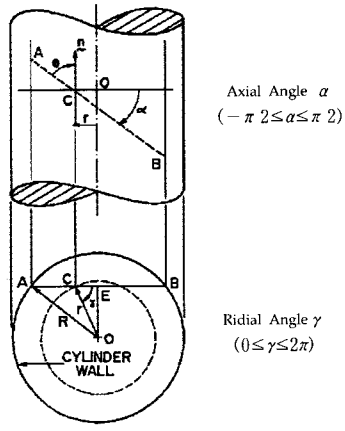

Fig. 15. Cylindrical geometry and coordinate system

여기서, I_v는 단위복사강도이고, θ는 실린더 벽면의 수직벡터와 광선과의 각도며, Ω는 입체각(solid angle)이다.

exponential kernel approximation 에 의해

$$q_\nu(y) = q_\nu^+(y) - q_\nu^-(y) \tag{9}$$

여기서,

$$q_\nu^\pm(y) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\alpha G^\pm(y,\alpha)d\alpha \tag{10}$$

이다.

각도 방향의 플럭스 $G^\pm(y,\alpha)$는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G^+(y,\alpha) = {} & E_\nu(R)\exp[-\{\tau(s_1)+\tau(s_s)\}] \\ & + \int_0^{s_1} E_\nu(t)\exp[-\{t+\tau(s_2)\}]dt \\ & + \int_0^{s_1} E_\nu(t)\exp[-\{-t+\tau(s_2)\}]dt \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} G^-(y,\alpha) = {} & E_\nu(R)\exp[-\{\tau(s_1)+\tau(s_s)\}] \\ & + \int_{s_2}^{s_1} E_\nu(t)\exp[-\{t+\tau(s_2)\}]dt \end{aligned} \tag{12}$$

여기서,

$$s_1 = \sqrt{R^2 - y^2\sin^2\alpha}, \quad s_2 = y\cos\alpha \tag{13}$$

E_v는 흑체방사(black body emission)량이며 R은 실린더의 반지름, τ는 광학두께(optical thickness) 이다. α는 횡단면에서 각도방향과 투영되는 선 사이의 각도다.

반지름 y에서 전체 복사 플럭스는 다음과 같다.

$$q_R(y) = \int_0^\infty q_\nu(y)d\nu \tag{14}$$

multi-band 의 개념을 적용하여 복사 플럭스는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$q_R(y) = \sum_n q_n(y) \tag{15}$$

본 연구에서 복사열전달 모델은 ARCFLO 코드와 같은 two-band 모델을 사용하였다.

2.4 난류모델

본 연구의 관심 있는 유동조건 하에서, 유동의 레이놀즈 수는 냉가스 물성치와 컨스트릭터의 지름을 기준으로 약 1×10^6 이상이다[2]. 이 값은 보통 천이 레이놀스 수로 알려진 3×10^3을 넘기 때문에 유동은 난류가 된다.

난류 모델의 해석 성능은 유동장의 특성에 따라서 크게 달라지기 때문에 적절한 모델을 선택하는 것이 중요하다. 지금까지 아크히터 내부 유동 계산에 쓰인 대수 난류 모델은 난류요동과 평균류(mean flow)의 상호관계를 대수적인 경험식에 의하여 계산하는 방법이다. 이 모델들은 기본적으로 난류의 생성율과 소산율이 대략 같다고 가정하였지만 대류는 포함하지 않는다[8,9]. 이것은 대부분의 유동장의 물리현상과 다르다. 아크히터 내부의 유동은 벽면을 통해 유입되는 기체로 인하여 난류의 생성과 성장이 매우 강하고, 아크 가열과 강한 열전달로 인하여 온도 구배가 큰 복잡한 유동이다. 따라서 아크 히터 내부를 정확하게 해석하기 위해서는 지속적인 난류 생성과 성장을 표현할 수 있고 경험적인 요소가 적은 발전된 난류 모델이 필요하다.

본 연구를 위해 2 방정식 모델을 사용하였다. 2 방정식 난류 모델은 복잡한 유동장에서 난류의 물리 현상을 잘 묘사하기 위해서 개발되었다. 이 모델들은 난류의 대류, 확산, 생산, 소산을 모두 표현할 수 있으며, 현재 많은 공학 분야에서 사용되어지고 있다. $k-\varepsilon$ 난류 모델, $k-\omega$ 난류 모델, $k-\omega$ SST 난류 모델을 시험했으며, $k-\varepsilon$ 난류 모델이 아크히터 내부 유동장을 가장 잘 해석함을 확인하였다.

III. 계산결과

3.1 실험 데이터와 비교

개발된 코드를 검증하기 위해서, 계산 결과를 Arnold Engineering Development Center와 Sandia National Laboratory에 있는 아크히터의 실험 결과와 비교하였다. 컨스트릭터의 지름은

Table 1. Comparison of the calculated results for Arnold Engineering Development Center data

	Operating Condition	Method	Constrictor Voltage		Mass-averaged Enthalpy		Constrictor Pressure		Arc-heater Efficiency	
			V	error,%	10^7 J/kg	error,%	atm	error,%	%	error,%
Case1	I=591 A $\dot{m}$=0.0249 kg/s	Experiment	2120		1.626		26.2		32.4	
		kε model	2096	1.1	1.721	5.8	26.1	0.4	31.9	1.5
		kω model	1842	13.1	1.503	7.6	23.4	10.7	22.9	29.3
		kω-sst model	1676	20.9	1.633	0.4	21.2	19.1	19.6	39.5
Case2	I=575 A $\dot{m}$=0.0536 kg/s	Experiment	3300		1.387		53.7		38.5	
		kε model	3101	6.0	1.401	1.0	52.7	1.9	37.4	2.9
		kω model	2643	19.9	1.239	10.7	46.6	13.2	27.9	27.5
		kω-sst model	2374	28.1	1.307	5.8	41.7	22.3	23.4	39.2
Case3	I=475 A $\dot{m}$=0.0544 kg/s	Experiment	3300		1.239		53.2		43.0	
		kε model	3205	2.9	1.277	3.1	52.3	1.7	40.4	6.0
		kω model	2695	18.3	1.140	8.0	46.3	13.0	30.9	28.1
		kω-sst model	2412	26.9	1.192	3.8	42.0	21.0	26.2	39.1
Case4	I=370 A $\dot{m}$=0.0549 kg/s	Experiment	3360		1.067		51.0		47.1	
		kε model	3291	2.1	1.147	7.5	50.8	0.4	45.3	3.8
		kω model	2767	17.6	1.021	4.3	45.1	11.6	34.2	27.4
		kω-sst model	2450	27.1	1.071	0.4	40.6	20.4	26.2	44.4
Case5	I=682 A $\dot{m}$=0.0617 kg/s	Experiment	3544		1.369		64.0		34.9	
		kε model	3460	2.4	1.427	4.2	62.2	2.8	33.6	3.7
		kω model	2958	16.5	1.274	6.9	55.6	13.1	25.6	26.6
		kω-sst model	2498	29.5	1.355	1.0	49.5	22.7	22.7	35.0
Case6	I=561 A $\dot{m}$=0.0871 kg/s	Experiment	4465		1.226		84.4		42.6	
		kε model	4352	2.5	1.182	3.6	82.1	2.7	36.7	13.8
		kω model	3744	16.1	1.070	12.7	73.1	13.4	27.7	35.0
		kω-sst model	3203	28.3	1.111	9.4	64.8	23.2	23.8	44.1

각각 0.0237m과 0.0254m이고 컨스트릭터의 길이는 각각 0.4699m과 0.9535m이며 노즐의 지름은 각각 0.00546m과 0.0084m이다. 계산 후, 아크히터의 기본 성능인자인 컨스트릭터 내의 전압, 평균 질량엔탈피, 컨스트릭터 내부 압력, 효율을 비교하였다.

질량 평균엔탈피는 다음과 같이 계산하였다.

$$\overline{h} = \frac{\int_0^R 2\pi y \cdot h(x,y)u(x,y)dy}{\int_0^R 2\pi y \cdot u(x,y)dy} \tag{16}$$

효율은 다음과 같이 계산하였다.

$$\eta = \frac{power\ absorbed\ by\ flow}{power\ input} = \frac{q_R - q_c}{I \cdot V_{tatal}} \tag{17}$$

Table 1은 Arnold engineering development center 아크히터의 성능 인자를 계산 결과와 비교한 것이다. 계산 조건은 임의적으로 선택하였다. $k-\varepsilon$ 난류 모델을 사용한 대부분 계산 결과는 거의 모든 영역에서 실험 결과와 5% 이내의 오차를 가지고 일치했지만, $k-\omega$ 모델과 $k-\omega$ SST 모델의 계산 결과는 질량 평균 엔탈피를 제외하고 10% 이상의 오차를 보였다. 특히 이 모델들은 효율의 경우 20% 이상의 오차를 보였다. Fig. 3, 4 5, 6은 Sandia national laboratory 아크히터의 성능 인자를 계산 결과와 비교한 것이다. 일정한 질량유입량에 전류를 증가시켜가며 계산하였다. 그림들에서 보듯이, $k-\varepsilon$ 모델의 계산 결과는 대부분의 영역에서 실험 결과와 5% 내외의 오차로 잘 일치하였지만, 전압의 경우 10~20%의 차이가 발생하였다. $k-\omega$ 모델의 경우, 대부분의 영역에서 5% 내외의 오차를 보였지만, 효율의 경우 20%까지 오차가 컸다. $k-\omega$ SST 모델의 경우, 컨스트릭터 내부의 압력를 제외한 대부분의 영역에서 큰 오차를 보였다. 특히 효율의 경우 30% 내외의 오차를 보였다. 두 종류의 아크히터 계산 결과를 종합해 보면 $k-\varepsilon$ 모델의 계산 결과가 다른 모델의 계산 결과보다 전반적으로 우수하다.

Sandia national laboratory 아크히터의 계산 결과에서, $k-\varepsilon$ 난류 모델을 사용한 경우 컨스트릭터 내부 압력의 오차가 비교적 크게 발생하였다. 이는 아크히터 양전극관과 음전극관의 정확한 형상을 알지 못하기 때문이다. 전압의 크기는 양전극관과 음전극관의 길이에 따라 조금의 차이를 보인다. 본 연구에서, Arnold Engineering

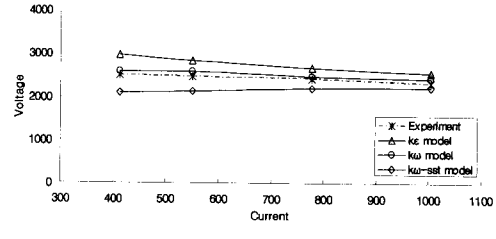

Fig. 3. Comparison of voltage

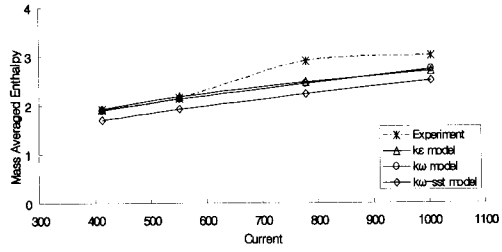

Fig. 4. Comparison of mass averaged enthalpy

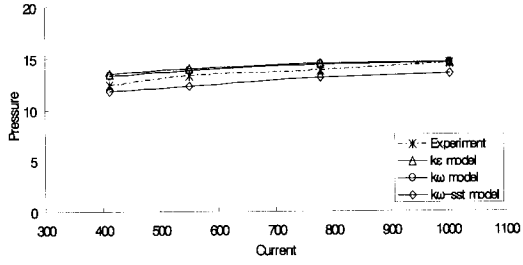

Fig. 5. Comparison of pressure

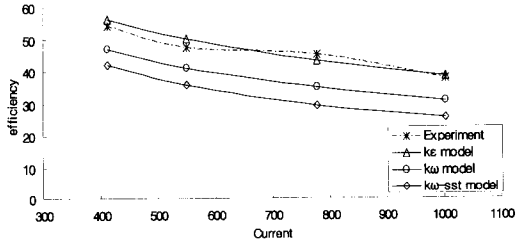

Fig. 6. Comparison of efficiency

Development Center 아크히터의 전극관의 치수는 Fig. 1의 형상과 비례한다고 가정하였으며, Sandia National Laboratory 아크히터 전극관의 치수는 Arnold Engineering Development Center 아크히터의 치수와 같다고 가정하였다.

3.2 내부 유동 분석

아크히터 내부의 유동 특성을 파악하기 위해, $k-\varepsilon$ 난류 모델을 사용하여 Sandia National Laboratory 아크히터에 대한 유동해석을 수행하였다. 컨스트릭터 벽면을 통한 질량 유입량은 0.029kg/s이고, 전류는 1003A이다. 컨스트릭터 벽면에서 유입되는 기체는 벽면 전체에서 균일하게 유입한다고 가정하였으며, 아크 히터의 벽면 온도는 복사와 전도에 의해 벽면에 전달된 열이 디스크 내부의 냉각수에 의해 흡수되기 때문에 일정하게 유지된다고 가정하였다. 유동은 노즐 목을 지나 초음속으로 빠져나가므로 유출류의 값은 내부 계산 영역의 값을 외삽하였다. 양전극관은 절반만 해석하였으며 입구 경계조건은 대칭으로 주었다. 계산 격자는 Fig. 7과 같으며 97x50의 격자 크기를 가진다.

Fig. 8은 아크히터 내부의 유선을 나타낸다. 이것은 컨스트릭터 벽면을 통해 기체가 유입되는 것을 보여준다. Fig. 9는 축방향에 따른 단위 시간당 질량유량을 나타낸다. 컨스트릭터 벽면에서 일정량의 가스가 골고루 유입되므로 컨스트릭터 내부에서 단위 시간당 질량유량은 축방향으로 선형적으로 증가한다. Fig. 10은 축방향에 따른 코

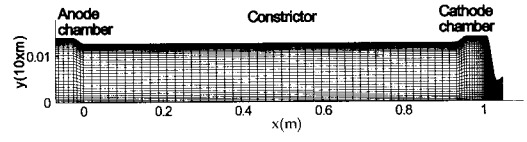

Fig. 7. Typical grid

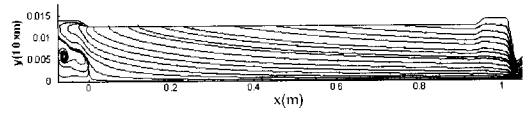

Fig. 8. Streamline for the sample case

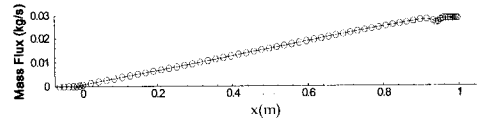

Fig. 9. Mass flux along the axial direction for the sample case

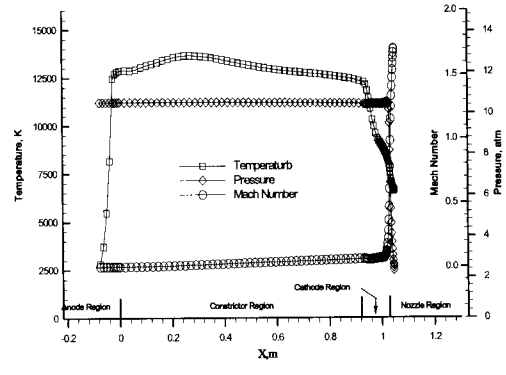

Fig. 10. Distribution of properties along the axis

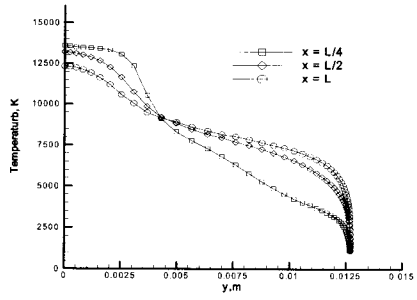

Fig. 11. Radial distribution of temperature

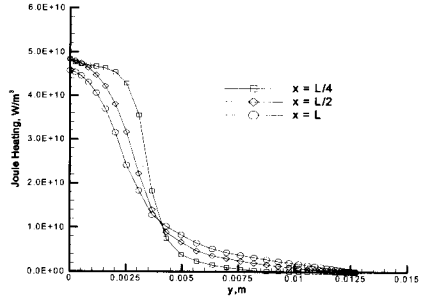

Fig. 12. Radial distribution of Joule heating

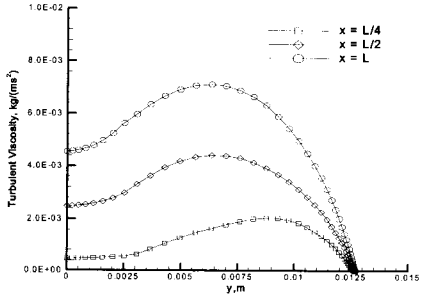

Fig. 13. Radial distribution of turbulent viscosity

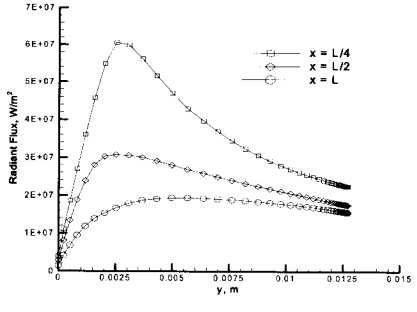

Fig. 14. Radial distribution of radiant flux

어에서의 물성치 분포 보여준다. 그림에서 마하수는 컨스트릭터 내에서 천천히 선형적으로 증가하고, 노즐 입구부터 빠르게 증가하여 노즐목에서 음속에 도달한 후 초음속이 된다. 그림에서 코어에서의 기체의 온도는 컨스트릭터 앞부분에서 최고값에 도달하며, 컨스트릭터 뒤쪽으로 갈수록 천천히 낮아지고, 노즐을 통과하면서 빠르게 낮아진다. 컨스트릭터 내부의 기체는 아크에 의해 직접 가열되기 때문에, 다른 부분에 비해 높은 온도를 유지하고 있다. 그리고 압력은 양전극관, 컨스트릭터, 음전극관에서 일정한 값을 가지며, 그 후 유동이 노즐을 통해 급격하게 팽창하면서 빠르게 감소한다.

Fig. 11, 12, 13, 14는 컨스트릭터 내부에서 각각 축방향으로 L/4, L/2, L지점에서의 반지름 방향으로의 물성치 분포를 보여준다. Fig. 11은 온도 분포를 보여준다. 온도는 코어 부근에서 가장 높고, 반지름 방향으로 갈수록 감소하여 벽면 온도에 도달한다. 이런 현상은 아크히터 내부의 열전달 구조와 직접 관련이 있다. 코어 부근의 기체는 아크에 의해 직접 가열되며, 이렇게 생성된 열에너지는 복사와 난류 혼합에 의해 주변 기체로 전달되어, 벽면 온도로 유입되는 기체의 온도를 상승시킨다. 난류 혼합에 의한 열전달은 컨스트릭터 뒤쪽으로 갈수록 증가하여, 코어 부근의 온도를 낮추고, 벽면 근처의 온도를 증가시킨다. Fig. 12는 줄가열 양을 보여준다. 그림에서 보듯이 대부분의 줄가열은 코어에서 발생한다. 이 때문에 코어 부근에서의 온도는 가장 높다. Fig. 13은 난류 점성의 분포를 나타낸다. 난류 점성이 클수록 난류에 의한 열에너지 교환이 활발해진다. 난류 점성은 벽면과 코어의 중간 부분에서 가장 큰 값을 가지며, 컨스트릭터 뒤쪽으로 갈수록 그 값은 증가한다. Fig. 14는 복사 열전달 플럭스를 나타낸다. 복사 열전달 플럭스가 음의 기울기를 가지면 열에너지를 흡수하고, 양의 기울기를 가지면 열에너지를 방출한다. 코어 부근의 기체는 많은 열에너지를 방출하며, 이 에너지를 벽면 근처의 기체가 흡수한다. 컨스트릭터 뒤쪽으로 갈수록 복사에 의한 열전달 양이 줄어든다.

Fig. 15과 16은 각각 컨스트릭터 가운데와 끝에서, 반지름 방향에 따른 기체의 열 흡수량을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 난류에 의한 열 흡수량은 복사에 의한 열 흡수량보다 크다. 이것은 아크히터 내부 유동에서, 난류가 전체 열전달 구조에 미치는 영향이 복사 열전달만큼 크다는 것을 나타낸다. 이것은 아크히터 내부 유동

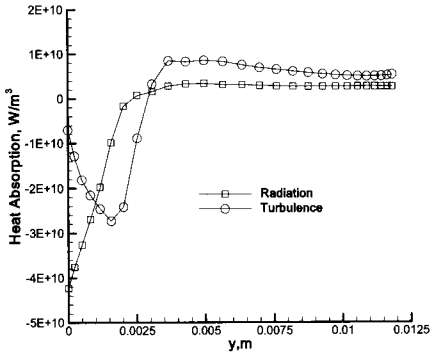

Fig. 15. Heat absorption at x=L/2

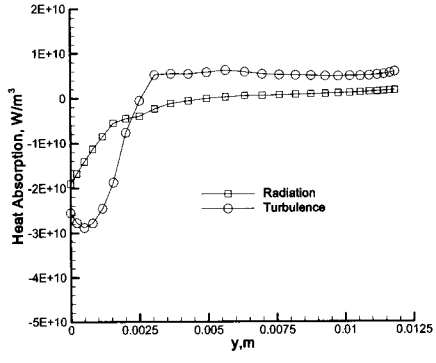

Fig. 16. Heat absorption at x=L

을 해석하기 위해서 보다 정확한 난류 계산이 필요하다는 것을 말해준다.

Ⅳ. 결 론

아크히터 내부의 유동을 정확하기 모사하기 위해서, 2방정식 난류 모델을 사용하여 기존의 대수적 난류 모델의 문제점을 보완하고 계산 결과를 토대로 난류가 전체 유동에 미치는 영향을 고찰하였다. 난류 모델에 따라 아크히터 내부 유동이 매우 민감하게 반응하는 모습을 볼 수 있었는데, 여러 난류 모델 중 $k-\varepsilon$ 모델이 유동 특성을 가장 정확히 예측했다. $k-\varepsilon$ 모델을 이용한 결과, 컨스트릭터에서의 질량 평균 엔탈피, 컨스트릭터 내부 압력 그리고 아크히터의 효율 등의 아크히터의 기본 성능인자들의 오차 범위는 대략 5%~10% 정도였다. 그리고 아크히터 내부유동 분석 결과, 난류에 의해서 큰 영향을 받기 때문에 보다 정확한 계산을 위해서는 난류 현상에 대한 체계적인 연구가 필요하다는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부 '두뇌한국 21 사업'의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1) Watson, V. R., and Pegot, E. B., "Numerical Calculations for the Characteristics of a Gas Flowing Axially Through a constrictor Arc", NASA TN D-4042, 1966.

2) Nicolet, W. E., Shepard, C. E., C. E., Clark, K. J. Balakrishnan, A., Kesselring, J. P., Suchsland, K. E. and Reese, J. J., "Analytical and Design Study for a High-Pressure, High-Enthalpy Constricted Arc Heater", AEDC-TR-75-47, Arnold AFB, TN, 1975.

3) Sakai, T., Sawada, K. "Application of Plank-Rosseland-Gray Model for High Enthalpy Arc Heaters", AIAA paper 98-2838. June 1998.

4) Sakai, T., Olejniczak, J. "Improvment in a Navier-Stokes Code for Arc Heater Flows", AIAA paper 2003-3782. June 2003.

5) 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.

6) Srinivasan, S., Tannehill, J. C., and Weilmuenster K. J., "Simplified Curve Fits for the Thermodynamic Properties of Equilibrium Air", NASA RP-1181, Aug. 1987.

7) Gupta, R. N., Lee, K. P., Thompson, R. A., and Yos, J. M., "Calculations and Curve Fits of Thermodynamics and Transport Properties for Equilibrium Air to 30000 K", NASA RP-1260, 1991.

8) Wilcox, D. C., "Turbulence Modeling for CFD", DCW Industries, 1993.

9) Hoffmann, K. A., " Computational Fluid Dynamics Volume III", Engineering Education System, 2000.